

Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Génie Electrique

Présentée et soutenue par :

Ziad OBEID

le : jeudi 5 juillet 2012

Titre :

Mise au point d'algorithmes pour la détection de dégradations de roulements d'actionneurs synchrones à aimants permanents. Application dans le domaine aéronautique sur des ventilateurs embarqués

Ecole doctorale :

Génie Electrique, Electronique et Télécommunications (GEET)

Unité de recherche :

Laboratoire LAPLACE - UMR5213

Directeur(s) de Thèse :

M. Pascal MAUSSION

T E R . . . { 3 U O O P O U E O [a a ^ & ^ ! A ^ A @ - ^

Rapporteurs :

M. Mohamed BENBOUZID

M. Hubert RAZIK

Membre(s) du jury :

M. Claude MARCHAND, Président

M. Pascal MAUSSION, Membre

M. Jérémie REGNIER, Codirecteur de thèse

M. Mohamed BENBOUZID, Rapporteur

M. Hubert RAZIK, Rapporteur

Résumé

Ce travail de thèse traite de la détection des défauts mécaniques des roulements à billes par analyse de grandeurs mécaniques et électriques dans des machines synchrones à aimants permanents haute vitesse. Le domaine applicatif de ce travail concerne l'aéronautique.

Généralement, pour surveiller l'état des roulements à billes dans un actionneur électrique, des mesures vibratoires sont réalisées. Elles permettent, en exploitant le spectre du signal vibratoire, de mettre facilement en évidence la détérioration du roulement. Cette méthode de surveillance est cependant relativement couteuse en termes d'instrumentation et le placement d'un capteur vibratoire dans des équipements à fort degré d'intégration est parfois difficile.

Nous proposons dans ce mémoire d'utiliser d'autres grandeurs physiques prélevées sur le système pour réaliser la surveillance de ces défauts. Il peut s'agir de grandeurs mécaniques (vitesse, position par exemple) et de grandeurs électriques (courant statorique, courant onduleur par exemple). L'utilisation de données déjà disponibles dans l'équipement pour les besoins de la commande permet ainsi de supprimer le système d'acquisition vibratoire.

A partir d'enregistrements temporels de données réalisées au cours de campagnes d'essais, nous proposons des méthodologies de traitement du signal permettant d'extraire automatiquement des informations sensibles au défaut à surveiller. L'idée finale est de construire des indicateurs de l'état de santé des roulements permettant de prendre « juste à temps » des décisions fiables relatives à la maintenance ou à la sécurisation de l'équipement.

Pour construire ces indicateurs, les signatures spécifiques aux défauts de roulements sont étudiées de manière théorique et expérimentale, pour l'ensemble des grandeurs prélevées. Leurs propriétés sont mises en évidence, permettant ainsi de définir les bandes fréquentielles les plus contributives au diagnostic. L'extraction de ces signatures est réalisée dans le domaine fréquentiel selon plusieurs méthodes. Deux types d'indicateurs automatiques différents sont proposés. Le premier est construit directement à partir du spectre d'amplitude des grandeurs par extraction de l'amplitude des harmoniques dans des bandes fréquentielles particulières. Le second intègre une dimension statistique dans l'analyse en exploitant le caractère aléatoire de certains harmoniques pour détecter la présence du défaut.

Des critères de comparaison sont définis et utilisés pour étudier les performances des indicateurs proposés pour deux campagnes d'essais avec des roulements artificiellement dégradés, pour différentes vitesses de fonctionnement et pour différents paramètres de réglage des indicateurs.

Mots Clés

- Machine synchrone à aimants permanents
- Défaut mécanique
- Défaut de roulements
- Kurtosis spectral
- Surveillance et diagnostic
- Analyse spectrale
- Défaut non stationnaire
- Défaut localisé/non localisé

Abstract

This Ph.D. thesis deals with detection of mechanical bearings faults by analysis of mechanical and electrical signals in high speed permanent magnet synchronous machine. The application domain of this work concerns aeronautics.

Generally, to monitor the ball bearings status in electrical actuator, the vibration measurements are used. They allow, by extracting the vibration spectrum, to easily detect the deterioration of the bearing. This monitoring method is relatively expensive in terms of instrumentation and placing a vibration sensor in equipment with a high integration degree can be difficult.

We propose in this paper to use other physical quantities taken from the system to perform the monitoring of these defects. It may be mechanical quantities (for example speed, position) and electrical quantities (for example stator current, power inverter).

From time recording of data carried out during test campaigns, we propose signal processing methodologies to automatically extract information sensitive to the monitored fault. The final idea is to construct indicators of bearings health and make decisions relating to maintenance or equipment security.

To construct these indicators, specific bearing defects signatures are studied theoretically and experimentally, for all collected variables. The extraction of these signatures is carried out in frequency domain. Two different types of automatic indicators are proposed. The first is constructed directly from the amplitude spectrum by extraction of the harmonic amplitude of the spectrum in particular frequency bands. The second includes a statistical dimension analysis by exploiting the random nature of some harmonics to detect fault presence.

Criteria of comparison are defined and used to study the proposed indicators performances for two trial campaigns with artificially degraded bearings, for different speed functioning and for different regulation of indicators parameters.

Keywords

- permanent magnet synchronous machine
- Mechanical faults
- Bearing faults
- Spectral Kurtosis
- Condition monitoring
- Spectral analysis
- Stationary defect
- Single point defect/Generalized roughness

Remerciement

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au Laboratoire PLASMA et Conversion d'Energie (LAPLACE) à l'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications (ENSEEIH) de l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT) au sein du groupe COMMANDE et DIAGNOSTIC des Systèmes Electriques (CODIASE).

Ces remerciements sont l'occasion d'exprimer ma gratitude notamment aux personnes qui ont composé mon environnement durant les années de thèse. J'espère que le futur me donnera l'occasion de vous témoigner à tous ma gratitude autrement que par des mots.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse M. Pascal MAUSSION, responsable du groupe CODIASE (Commande et DIAGNOSTIC des Systèmes Electriques) et Professeur à l'Institut National Polytechnique de Toulouse pour son soutien tout au long de ces études, ainsi que pour la confiance qu'il m'a accordé en acceptant de diriger mes travaux. Sachez que j'ai essayé d'apprécier à sa juste valeur chaque instant qui m'a été offert de travailler sous votre direction.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Jérémie REGNIER, qui, en tant que co-directeur de thèse, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce travail. Son aide ainsi que ses relectures m'ont souvent permis d'orienter avec efficacité mes efforts et d'améliorer certains points, sans quoi cette thèse n'aurait jamais vu le jour.

Je remercie les Professeurs Mohamed BENBOUZID, professeur au Laboratoire Brestois de Mécanique et des Systèmes (LBMS), et Hubert RAZIK, professeur au Laboratoire AMPERE de Lyon, pour avoir acceptés d'être rapporteurs de mes travaux. Je vous adresse toute ma gratitude pour l'honneur et la confiance que vous me témoignez.

Je remercie M. Claude MARCHAND, professeur au Laboratoire de Génie Electrique de Paris (LGE) pour avoir acceptés de faire partie du jury.

Je remercie également M. Christian LAURENT, Directeur du laboratoire LAPLACE, et M. Maurice FADEL, Directeur adjoint du laboratoire LAPLACE qui ont autorisés que cette thèse se déroule à l'ENSEEIH (Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications).

J'adresse mes remerciements également aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail, ainsi qu'à la réussite pendant ces années de thèse, je m'adresse à M. Baptiste TRAJIN et M. Antoine PICOT.

Je tiens à remercier M. Thierry MISSON, Président Directeur Général de la société TECHNOFAN, qui m'a permis d'effectuer les études expérimentales dans son entreprise.

Je présente à M. Olivier DARNIS mes remerciements sincères pour avoir acceptés de faire partie du jury, et pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Sylvain POIGNANT, pour son encadrement à TECHNOFAN et la grande patience dont il a su faire preuve malgré ses charges professionnelles.

Je remercie également tous les personnels de TECHNOFAN qui ont contribué à mon intégration dans l'entreprise et à l'atmosphère de travail environnante.

J'exprime ma gratitude à tous les membres du laboratoire LAPLACE et surtout à ceux qui ont accepté de répondre à mes questions avec gentillesse.

Je n'oublie pas mes parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Il est difficile de trouver les mots pour vous dire à quel niveau votre soutien m'a profondément émue.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de ma thèse, je m'adresse aux membres du groupe CODIASE, à Majid SOULEY, Meriam ABDELLATIF, aux membres de chicha club : Alaric MONTENON et Mustapha DEBBOU, à tous les amis qui ont participé à la préparation du pot de thèse, à mes anciens et nouveaux colocataires, Ayman TRAD, Omar EL AYOUBI, Aziz ZIANI et Osman BREIG, à tout mon entourage de Marseille, Lyon Nice et surtout Toulouse.

Merci à tous et à toutes.

Table des matières

RESUME	I
ABSTRACT	III
REMERCIEMENT	V
TABLE DES MATIÈRES	VII
TABLE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES TABLEAUX	XVII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : CADRE GENERAL DE L'ETUDE, ETUDE THEORIQUE DES DEFAUTS DE ROULEMENTS	5
1.1 INTRODUCTION	7
1.2 PRESENTATION DU PROJET PREMEP	9
1.3 PRESENTATION DE L'ENTREPRISE	10
1.3.1 Le groupe SAFRAN	10
1.3.2 La société TECHNOFAN	11
1.4 MAINTENANCE	13
1.5 SURVEILLANCE DES MATERIELS	15
1.6 GENERALITES SUR LES ROULEMENTS A BILLES	15
1.7 CONCEPTION DES ROULEMENTS A BILLES	16
1.8 CARACTERISTIQUE DES ROULEMENTS A BILLES	17
1.9 ORIGINES DES DEFAILLANCES DES ROULEMENTS A BILLES	17
1.9.1 La contamination.....	18
1.9.2 La corrosion	18
1.9.3 La lubrification inadéquate.....	19
1.9.4 Défauts de montage.....	19
1.9.5 Effets des contraintes mécaniques.....	20
1.9.6 Circulation de courants électriques	21
1.10 LES ROULEMENTS HYBRIDES	22
1.11 CLASSEMENT DES DEFAUTS DE ROULEMENTS	25
1.11.1 Les défauts localisés	25
1.11.2 Les défauts non localisés	26
1.12 DEFAUTS DE ROULEMENTS ET ANALYSE PAR MESURE DE TEMPERATURE.....	28
1.12.1 Etat de l'art de la détection par mesure de température	28
1.12.2 Détection des ruptures de roulements à billes SAFRAN-Technofan par mesure de température	28
1.13 DEFAUTS DE ROULEMENTS ET ANALYSE VIBRATOIRE	30
1.13.1 Etat de l'art de la détection par analyse vibratoire.....	30
1.13.2 Détection des ruptures de roulements à billes TECHNOFAN par mesure vibratoire.....	33

1.14	INFLUENCE DES DEFAUTS DE ROULEMENTS SUR LES COURANTS STATORIQUES.....	34
1.14.1	<i>Présentation générale.....</i>	34
1.14.2	<i>Excentricité.....</i>	34
1.14.3	<i>Oscillation du couple mécanique</i>	35
1.15	OUTILS MATHEMATIQUES UTILISEES POUR LA DETECTION DE DEFAUTS DE ROULEMENTS	37
1.15.1	<i>Généralités</i>	37
1.15.2	<i>Analyse fréquentielle, transformée de Fourier</i>	37
1.15.3	<i>Analyse temps-fréquence</i>	37
1.15.4	<i>Kurtosis spectral.....</i>	38
1.15.5	<i>Kurtogram</i>	39
1.16	CONCLUSION	41
CHAPITRE 2 : CAPITALISATION DE CONNAISSANCES SUR L'EQUIPEMENT EN REGIME SAIN		43
2.1	INTRODUCTION	45
2.2	PRESENTATION DE L'EQUIPEMENT ET DES SIGNAUX OBSERVES	46
2.3	CONTENU FREQUENTIEL DES SIGNAUX ISSUS DU CAPTEUR DE POSITION EN REGIME SAIN.....	49
2.4	CONTENU FREQUENTIEL DU COURANT STATORIQUE EN MODE SAIN.....	51
2.5	CONTENU FREQUENTIEL DU COURANT D'ONDULEUR EN MODE SAIN	53
2.6	OSCILLATION DE LA VITESSE	54
2.6.1	<i>Influence d'une oscillation de vitesse sur le signal capteur de position.....</i>	54
2.6.2	<i>Influence d'une oscillation de vitesse sur le courant statorique</i>	57
2.6.3	<i>Influence d'une oscillation de vitesse sur le courant onduleur</i>	57
2.7	INFLUENCE DES IMPERFECTIONS DE CONSTRUCTION SUR LE SIGNAL CAPTEUR DE POSITION.....	58
2.7.1	<i>Imperfection dans le calage d'un aimant de la roue polaire.....</i>	58
2.7.2	<i>Imperfection de calage d'un capteur de position</i>	60
2.8	INFLUENCE DES IMPERFECTIONS DE CONSTRUCTION SUR LE COURANT STATORIQUE	62
2.8.1	<i>Défaut de calage d'un aimant de la roue polaire.....</i>	62
2.8.2	<i>Défaut de calage d'un capteur de position.....</i>	62
2.9	INFLUENCE DES IMPERFECTIONS DE CONSTRUCTION SUR LE COURANT D'ONDULEUR.....	64
2.9.1	<i>Imperfection de calage d'un aimant de la roue polaire</i>	64
2.9.2	<i>Imperfection de calage d'un capteur de position</i>	64
2.10	SYNTHESE DES CONTENUS HARMONIQUES DES SIGNAUX	65
2.11	VALIDATION DU CONTENU HARMONIQUE DES SIGNAUX PAR SIMULATION.....	66
2.11.1	<i>Analyse des signaux issus du capteur de position</i>	66
2.11.2	<i>Analyse des signaux de courant statorique</i>	69
2.11.3	<i>Analyse du courant d'onduleur</i>	71
2.11.4	<i>Conclusion.....</i>	74
2.12	RESULTATS EXPERIMENTAUX ISSUS DE LA CAMPAGNE D'ESSAI - CAS SAIN	74
2.12.1	<i>Observation de la vitesse de rotation mécanique</i>	74
2.12.2	<i>Etude du Signal expérimental issu du capteur de position</i>	77

2.12.3	<i>Etude du signal courant statorique.....</i>	79
2.12.4	<i>Etude du signal courant d'onduleur.....</i>	81
2.12.5	<i>Harmoniques supplémentaires liés à l'asynchronisme.....</i>	83
2.13	CONCLUSION	85
CHAPITRE 3 : RECHERCHE DES SIGNATURES FREQUENTIELLES CARACTERISANT LES DEFAUTS DE ROULEMENTS		87
3.1	INTRODUCTION	89
3.2	PRESENTATION DES CAMPAGNES D'ESSAIS EN MODE DE DEGRADATION	90
3.3	ETUDE DES SPECTRES : COMPARAISON ENTRE ENREGISTREMENTS SAINS ET DEFAILLANTS	93
3.3.1	<i>Etude du signal vitesse</i>	95
3.3.2	<i>Etude du signal position</i>	98
3.3.3	<i>Etude du signal courant de phase</i>	103
3.3.4	<i>Etude du signal courant d'onduleur.....</i>	105
3.4	CONSTRUCTION DES INDICATEURS ENERGETIQUES	109
3.4.1	<i>Indicateurs d'énergie sur le spectre de vitesse.....</i>	110
3.4.2	<i>Indicateurs d'énergie sur le spectre position</i>	114
3.4.3	<i>Indicateurs d'énergie sur le spectre de courant statorique.....</i>	119
3.4.4	<i>Indicateur d'énergie sur le spectre de courant onduleur.....</i>	124
3.5	CRITERES DE COMPARAISON DES INDICATEURS	126
3.5.1	<i>Critère 1 : Rapidité de détection</i>	128
3.5.2	<i>Critère 2 : qualité de la séparation sain / défaillant.....</i>	128
3.5.3	<i>Critère 3 : Fiabilité de l'indicateur en cas défaillant</i>	128
3.5.4	<i>Critère 4 : Fiabilité de l'indicateur en cas sain.....</i>	129
3.5.5	<i>Critère généralisé.....</i>	129
3.5.6	<i>Critère généralisé sur les indicateurs de vitesse</i>	130
3.5.7	<i>Critère généralisé sur les indicateurs de position.....</i>	133
3.5.8	<i>Critère généralisé sur les indicateurs de courant statorique</i>	134
3.5.9	<i>Critère généralisé sur les indicateurs de courant onduleur.....</i>	136
3.6	CONCLUSION SUR LES INDICATEURS ENERGETIQUES	137
3.7	SIGNATURES SUPPLEMENTAIRES DETECTEES	138
3.8	INDICATEUR DE DEFAUT LIE AU PROBLEME ELECTRIQUE	141
3.9	CONCLUSION	144
CHAPITRE 4 : CONSTRUCTION D'INDICATEURS STATISTIQUES UTILISANT LE KURTOSIS SPECTRAL POUR LA DETECTION DE DEFAUTS DE ROULEMENTS.....		147
4.1	INTRODUCTION	149
4.2	INTRODUCTION DU KURTOSIS SPECTRAL, OUTILS D'ETUDE STATISTIQUE POUR LES SIGNAUX A CARACTERE NON STATIONNAIRE	150
4.2.1	<i>Définition du Kurtosis</i>	151
4.2.2	<i>Introduction du Kurtosis spectral.....</i>	153
4.2.3	<i>Exemple d'un signal de synthèses analysé avec le Kurtosis Spectral</i>	154
4.3	INTRODUCTION DU KURTOSIS SPECTRAL DANS SA REPRESENTATION CUMULEE.....	156

4.3.1	<i>Application du Kurtosis cumulé sur un signal de synthèse modulé en phase.....</i>	<i>159</i>
4.4	KURTOSIS SPECTRAL DU SIGNAL VITESSE.....	160
4.5	KURTOSIS SPECTRAL DU SIGNAL POSITION	163
4.6	KURTOSIS SPECTRAL DU SIGNAL COURANT STATORIQUE	166
4.7	KURTOSIS SPECTRAL DU SIGNAL COURANT ONDULEUR	169
4.8	CONSTRUCTION DES INDICATEURS EXPLOITANT LE KURTOSIS SPECTRAL	173
4.8.1	<i>Application de l'indicateur Kurtosis Spectral Cumulé sur les signaux étudiés.....</i>	<i>174</i>
4.9	KURTOSIS SPECTRAL AVEC SELECTION DE FREQUENCES	177
4.9.1	<i>Indicateur Kurtosis Spectral de vitesse</i>	<i>177</i>
4.9.2	<i>Indicateur Kurtosis Spectral de position.....</i>	<i>179</i>
4.9.3	<i>Indicateur Kurtosis Spectral de courant statorique</i>	<i>182</i>
4.9.4	<i>Indicateur Kurtosis Spectral de courant onduleur.....</i>	<i>185</i>
4.10	APPLICATION DES CRITERES DE QUALITE SUR LES INDICATEURS SK.....	188
4.10.1	<i>Critères généralisés des indicateurs SK de vitesse.....</i>	<i>189</i>
4.10.2	<i>Critères généralisés des indicateurs SK de position.....</i>	<i>191</i>
4.10.3	<i>Critères généralisés des indicateurs SK de courant statorique.....</i>	<i>193</i>
4.10.4	<i>Critères généralisés des indicateurs SK de courant onduleur.....</i>	<i>194</i>
4.11	KURTOSIS SPECTRAL AVEC REMISE A REFERENCE.....	197
4.12	CONCLUSION	200
CONCLUSION GENERALE		203
PERSPECTIVES		207
ANNEXES		209
ANNEXE A : CARACTERISATION DE LA CARTE DIAG-RLT DEDIEE A LA MESURE DES COURANTS D'UN VENTILATEUR LP2		211
PRESENTATION.....		211
CARACTERISATION DES VOIES DC		212
CARACTERISATION DES VOIES AC		214
ANNEXE B : INDICATEURS VIBRATOIRES		217
ANNEXE C : APPLICATION DES INDICATEURS SUR LA CAMPAGNE N°2		219
REFERENCES.....		249

Table des figures

Figure 1-1 : Répartition du chiffre d'affaire du groupe SAFRAN[3]	11
Figure 1-2 : Ventilateurs basse pression [3].....	12
Figure 1-3 : Ventilateurs de refroidissement des freins [3].....	12
Figure 1-4 : Vannes de distribution [3]	12
Figure 1-5 : système de ventilation avionique et ventilateur LP2 [18].....	13
Figure 1-6 : coût de maintenance [25]	14
Figure 1-7 : Pourcentage de défauts sur les différents éléments des machines asynchrones [30].....	16
Figure 1-8 : Principaux éléments d'un roulement à billes [34]	16
Figure 1-9 : Roulement à billes sous charge axiale et radiale [38].....	17
Figure 1-10 : Ecaillage des roulements [42]	18
Figure 1-11 : Effets sur les pistes de roulements de contaminations du lubrifiant [42]	18
Figure 1-12 : Effets de la corrosion de roulements [42].....	19
Figure 1-13 : Effet de la lubrification inadéquate de roulements [42]	19
Figure 1-14 : Endommages physiques créés par le défaut de montage de roulements [42].....	20
Figure 1-15 : Répartition des contraintes radiales sur les bagues interne et externe du roulement [42]	20
Figure 1-16 : zone de charge des bagues internes et externes en présence des contraintes mécaniques [42]	21
Figure 1-17 : dégradations dues à des surcharges mécaniques [42].....	21
Figure 1-18 : influence de circulation du courant électrique [42]	22
Figure 1-19 : Mécanismes généraux d'usure des roulements hybrides [26]	24
Figure 1-20 : Présence des défauts non localisés sur les roulements [42].....	27
Figure 1-21 : emplacement des sondes de température dans le roulement [Technofan]	29
Figure 1-22 : extrait des indicateurs de température sur les roulements avant et arrière [Technofan]	29
Figure 1-23 : emplacement des capteurs vibratoires dans le roulement [Technofan]	33
Figure 1-24 : extrait des indicateurs vibratoires calculé entre 1 et 19 kHz sur les roulements avant et arrière [Technofan]	33
Figure 1-25 : différentes types d'excentricité : statique, dynamique et mixte [77]	35
Figure 2-1 : Ventilateur TECHNOFAN de type LP2- 5kVA – Vitesse max = 14100 tr/min - (origine TECHNOFAN).....	46
Figure 2-2 : Système de conditionnement d'air A380 - (origine TECHNOFAN)	46
Figure 2-3 : Coupe d'un équipement complet - (origine TECHNOFAN).....	47
Figure 2-4 : Vue de coupe d'un ensemble moteur avec la roue du ventilateur - (origine TECHNOFAN)	47
Figure 2-5 : Architecture du système	48
Figure 2-6 : Placement des capteurs de position par rapport à la roue polaire	49
Figure 2-7 : Forme d'onde du signal issu d'un des capteurs de position	49
Figure 2-8 : Spectre d'amplitude du signal position	50
Figure 2-9 : Loi de commande des interrupteurs en fonction des capteurs de position.....	51
Figure 2-10 : Forme du courant statorique sans MLI sur une période	52

Figure 2-11 : Forme d'onde du courant de phase et du courant d'onduleur sur une période électrique	53
Figure 2-12 : Fonctions de Bessel	56
Figure 2-13 : Signal capteur de position en présence d'un décalage aimant	59
Figure 2-14 : Signal <i>x_{dat}</i> rajouté au signal capteur de position sain en présence d'un décalage aimant	59
Figure 2-15 : Signal capteur de position en présence d'un décalage de capteur	60
Figure 2-16 : Influence d'un décalage de capteur de position sur le courant statorique	62
Figure 2-17 : Modèle de reconstruction des signaux issus des capteurs de position en présence d'une oscillation de la vitesse mécanique	66
Figure 2-18 : Contenu fréquentiel du spectre du signal de position en cas normal	67
Figure 2-19 : contenu fréquentiel du spectre de position en présence d'une oscillation de vitesse	67
Figure 2-20 : Contenu fréquentiel du spectre de position en présence du décalage d'un capteur de position et d'une oscillation de vitesse	68
Figure 2-21 : Contenu fréquentiel du signal de position en présence du décalage d'un aimant et d'une oscillation de vitesse	68
Figure 2-22 : Contenu fréquentiel du spectre de courant simulé en cas sain	69
Figure 2-23 : Contenu fréquentiel du spectre de courant simulé en présence d'une oscillation de vitesse	70
Figure 2-24 : Contenu fréquentiel simulé du spectre de courant en présence d'un décalage aimant et d'une oscillation de vitesse	70
Figure 2-25 : Contenu fréquentiel simulé du spectre de courant en présence d'un décalage capteur et d'une oscillation de vitesse	71
Figure 2-26 : Spectre du courant d'onduleur en cas sain	72
Figure 2-27 : Spectre du courant d'onduleur en présence d'une oscillation de vitesse	72
Figure 2-28 : Spectre du courant d'onduleur en présence d'un décalage d'aimant	73
Figure 2-29 : Spectre du courant d'onduleur en présence d'un décalage de capteur	73
Figure 2-30 : Erreur maximale sur l'estimation de vitesse en fonction de la vitesse de rotation	75
Figure 2-31 : Vitesse de rotation mécanique reconstituée à partir du signal du capteur de position	76
Figure 2-32 : Contenu fréquentiel de la vitesse de rotation – Cas sain	76
Figure 2-33 : Contenu fréquentiel du signal de position expérimental – Cas sain	78
Figure 2-34 : Contenu fréquentiel du spectre de courant statorique expérimental – Cas sain	80
Figure 2-35 : Décalage d'un capteur de position	81
Figure 2-36 : Contenu fréquentiel du spectre de courant d'onduleur expérimental – Cas sain	83
Figure 2-37 : Courant statorique dans une phase	83
Figure 2-38 : Présence d'harmonique d'asynchronisme à la vitesse 14100 tr/min	84
Figure 2-39 : Présence d'harmonique d'asynchronisme à la vitesse 14100 tr/min sur le courant en entrée de l'onduleur	85
Figure 3-1: Roulement sain et roulement défaillant	90
Figure 3-2 : Comparaison courant sain et courant défaillant sur une période mécanique	92
Figure 3-3 : Indicateur vibratoire à 12 000 tr/min (Campagne1)	93
Figure 3-4 : Indicateur vibratoire à 12 000 tr/min (Campagne2)	93
Figure 3-4 : Contenu fréquentiel du spectre vitesse (Campagne1) – Cas sain et défaillant à la vitesse 12 000 tr/min	95
Figure 3-5 : Contenu fréquentiel du spectre de vitesse – Cas sain (bleu) et défaillant (rouge) à 8000 tr/min	97

Figure 3-6 : Contenu fréquentiel du spectre vitesse – Cas sain (bleu) et défaillant (rouge) à 10 000 tr/min	97
Figure 3-7 : Contenu fréquentiel du spectre vitesse – Cas sain (bleu) et défaillant (rouge) à 14 100 tr/min	98
Figure 3-8 : Contenu fréquentiel du spectre du signal position – Cas sain et défaillant – 12 000 tr/min	101
Figure 3-9 : Contenu fréquentiel du spectre du signal position – Cas sain et défaillant – 8000 tr/min	101
Figure 3-10 : Contenu fréquentiel du spectre du signal position – Cas sain et défaillant – 10 000 tr/min	102
Figure 3-11 : Contenu fréquentiel du spectre du signal position – Cas sain et défaillant – 14 100 tr/min	102
Figure 3-12 : Contenu fréquentiel du spectre de courant statorique – Cas sain et défaillant – 12 000 tr/min	103
Figure 3-13 : Contenu fréquentiel du spectre de courant statorique – Cas sain et défaillant – 14 100 tr/min	104
Figure 3-14 : Contenu fréquentiel du spectre de courant statorique – Cas sain et défaillant – 10 000 tr/min	104
Figure 3-15 : Contenu fréquentiel du spectre de courant statorique – Cas sain et défaillant – 8000 tr/min	105
Figure 3-16 : Contenu fréquentiel du spectre de courant d'onduleur – Cas sain et défaillant – 12 000 tr/min ...	106
Figure 3-17 : Contenu fréquentiel du spectre de courant d'onduleur autour de $6f_s$ – Cas sain et défaillant – vitesse 12 000 tr/min	107
Figure 3-18 : Contenu fréquentiel du spectre de courant d'onduleur – Cas sain et défaillant – 14 100 tr/min ...	107
Figure 3-19 : Contenu fréquentiel du spectre de courant d'onduleur – Cas sain et défaillant – 10 000 tr/min ...	108
Figure 3-20 : Contenu fréquentiel du spectre de courant d'onduleur – Cas sain et défaillant – 8000 tr/min	108
Figure 3-21 : Construction de l'indicateur énergétique	110
Figure 3-22 : Evolution des familles harmoniques dans le spectre de vitesse au cours de la vie du roulement pour une vitesse de 12 000 tr/min.	111
Figure 3-23 : Evolution des familles harmoniques dans le spectre de vitesse au cours de la vie du roulement pour une vitesse de 8 000 tr/min.	112
Figure 3-24 : Evolution des familles harmoniques dans le spectre de vitesse au cours de la vie du roulement pour une vitesse de 10 000 tr/min.	113
Figure 3-25 : Evolution des familles harmoniques dans le spectre de vitesse au cours de la vie du roulement pour une vitesse de 14 100 tr/min.	113
Figure 3-26 : Indicateur maximum d'énergie pour $f = f_s \pm f_r$, $f = f_s \pm f_{cage}$ et $f = f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ Signal position à la vitesse 12 000 tr/min	115
Figure 3-27 : Indicateur maximum d'énergie pour $f = f_s \pm f_r$, $f = f_s \pm f_{cage}$ et $f = f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ - Signal position à la vitesse 8000 tr/min	116
Figure 3-28 : Indicateur maximum d'énergie pour $f = f_s \pm f_r$, $f = f_s \pm f_{cage}$ et $f = f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ - Signal position à la vitesse 10 000 tr/min	117
Figure 3-29 : Indicateur maximum d'énergie pour $f = f_s \pm f_r$, $f = f_s \pm f_{cage}$ et $f = f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ - Signal position à la vitesse 14 100 tr/min	118
Figure 3-30 : Indicateur maximum d'énergie pour $f = f_s \pm f_r$, $f = f_s \pm f_{cage}$ et $f = f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ Signal Courant statorique phase 1 à la vitesse 12 000 tr/min	120
Figure 3-31 : Indicateur Energie pour $f = f_s \pm f_r$, $f = f_s \pm f_{cage}$ et $f = f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ - Signal courant statorique phase 1 à 8000 tr/min	121
Figure 3-32 : Indicateur Energie pour $f = f_s \pm f_r$, $f = f_s \pm f_{cage}$ et $f = f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ - Signal courant statorique phase 1 à 10 000 tr/min	122
Figure 3-33 : Indicateur Energie pour $f = f_s \pm f_r$, $f = f_s \pm f_{cage}$ et $f = f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ - Signal courant statorique phase 1 à 14 100 tr/min	123
Figure 3-34 : Indicateur Energie pour $f = 6f_s \pm f_r$, $f = 6f_s \pm f_{cage}$ - Signal courant onduleur à 12 000 tr/min	124
Figure 3-35 : Indicateur Energie pour $f = 6f_s \pm f_r$, $f = 6f_s \pm f_{cage}$ - Signal courant onduleur à 8000 tr/min	125

Figure 3-36 : Indicateur Energie pour $= 6fs \pm fr$, $f = 6fs \pm fcage$ - Signal courant onduleur à 10 000 tr/min	125
Figure 3-37 : Indicateur Energie pour $= 6fs \pm fr$, $f = 6fs \pm fcage$ - Signal courant onduleur à 14 100 tr/min	126
Figure 3-38 : Indicateur Energie - spectre de position - campagne 1- fréquence $fs + fc$ - 12 000 tr/min....	127
Figure 3-39 : RadarPlot des Critères évalué pour l'indicateur Energie - signal de position - campagne 1- fréquence $fs + fc$ - 12 000 tr/min	129
Figure 3-40 : Spectre du courant statorique à 14 100 tr/min	138
Figure 3-41 : Spectre du courant statorique à 10 000 tr/min	138
Figure 3-42 : Spectre courant de bus à la fréquence 1208 Hz pour les différentes vitesses de fonctionnement	139
Figure 3-43 : spectre de courant de bus pour un redresseur défaillant	140
Figure 3-44 : Indicateur énergétique sur le signal courant de bus pour la fréquence $3fréseau$ pour différentes vitesses de fonctionnement	141
Figure 3-45 : Indicateur énergétique sur le signal courant statorique pour les fréquences $3fréseau \pm fs$ pour différentes vitesses de fonctionnement	142
Figure 3-46 : Indicateur énergétique sur le signal courant onduleur pour les fréquences $3frés$ pour différentes vitesses de fonctionnement	143
Figure 3-47 : défaut de flasque.....	144
Figure 4-1 : Kurtosis de certaines distributions connues.....	152
Figure 4-2 : Calcul du Kurtosis spectral.....	154
Figure 4-3 : FFT et SK du signal mêlant caractère stationnaire, non stationnaire et bruit	155
Figure 4-4 : TFCT du signal mêlant caractère stationnaire, non stationnaire et bruit	155
Figure 4-5 : Calcul du Kurtosis spectral cumulé	157
Figure 4-6 : Evolution du Kurtosis spectral cumulé en présence d'un harmonique non stationnaire	157
Figure 4-7 : Valeur finale du Kurtosis spectral	158
Figure 4-8 : SK cumulé maximal élevé au carré pour une modulation de fréquence.....	159
Figure 4-9 : calcul du Kurtosis spectral de vitesse	160
Figure 4-10 : Kurtosis Spectral de Vitesse à 12000 tr/min.....	160
Figure 4-11 : Kurtosis Spectral de vitesse à 8000 tr/min	161
Figure 4-12 : Kurtosis Spectral de vitesse à 10000 tr/min	162
Figure 4-13 : Kurtosis Spectral de vitesse à 14100 tr/min	162
Figure 4-14 : Kurtosis Spectral de vitesse et de position à 12 000 tr/min	164
Figure 4-15 : Kurtosis Spectral de position à 8000 tr/min	164
Figure 4-16 : Kurtosis Spectral de position à 10000 tr/min	165
Figure 4-17 : Kurtosis Spectral de position à 12000 tr/min	165
Figure 4-18 : Kurtosis Spectral de position à 14100 tr/min	166
Figure 4-19 : Kurtosis Spectral de courant à 8000 tr/min	167
Figure 4-20 : Kurtosis Spectral de courant à 10 000 tr/min	167
Figure 4-21 : Kurtosis Spectral de courant à 12 000 tr/min	168
Figure 4-22 : Kurtosis Spectral de courant à 14 100 tr/min	168
Figure 4-23 : Kurtosis Spectral du courant onduleur à 8000 tr/min	170
Figure 4-24 : Kurtosis Spectral du courant onduleur à 10 000 tr/min	170

Figure 4-25 : Kurtosis Spectral du courant onduleur à 12 000 tr/min	170
Figure 4-26 : Kurtosis Spectral du courant onduleur à 14 100 tr/min	171
Figure 4-27 : Indicateur Kurtosis Spectral de vitesse.....	174
Figure 4-28 : Indicateur Kurtosis Spectral de position.....	175
Figure 4-29 : Indicateur Kurtosis Spectral de courant statorique.....	175
Figure 4-30 : Indicateur Kurtosis Spectral de courant onduleur.....	176
Figure 4-31 : SKC vitesse à $fcage$	178
Figure 4-32 : indicateur SKC vitesse à $fr - 2fcage$	178
Figure 4-33 : indicateur SK position à $fs - fr \pm fBF$	179
Figure 4-34 : indicateur SKC position à $fs + fr \pm fBF$	180
Figure 4-35 : indicateur SKC position à $fs - fcage$	180
Figure 4-36 : indicateur SKC position à $fs + fcage$	181
Figure 4-37 : indicateur SKC position à $fs \pm fBF$	181
Figure 4-38 : indicateur SKC courant statorique à $fs + fr \pm fBF$	182
Figure 4-39 : indicateur SKC courant statorique à $fs - fr \pm fBF$	183
Figure 4-40 : indicateur SKC courant statorique à $fs + fc$	183
Figure 4-41 : indicateur SKC courant statorique à $fs - fc$	184
Figure 4-42 : indicateur SKC courant statorique à $fs \pm fBF$	184
Figure 4-43 : indicateur SKC courant onduleur à $2fs \pm fBF$	185
Figure 4-44 : indicateur SKC courant onduleur à $4fs \pm fBF$	186
Figure 4-45 : indicateur SKC courant onduleur à $6fs \pm fBF$	186
Figure 4-46 : indicateur SKC sur la fin de vie du roulement pour le signal de position	187
Figure 4-47 : Indicateurs énergétique et SK – vitesse = 14100 tr/mn, $N=2^{11}$, fréquence $fcage$ pour le signal vitesse	188
Figure 4-48 : Kurtosis spectral de vitesse à 12 000 tr/min – campagne N°2.....	189
Figure 4-49 : Indicateur SK du courant onduleur correspondant aux cas où le critère global atteint 100%	196
Figure 4-50 : Exemples où l'indicateur SK réagit avant l'indicateur vibratoire	197
Figure 4-51 : Calcul de l'indicateur SKREF	198
Figure 4-52 : indicateur SKREF- signal courant statorique à $fs \pm fcage$	199
Figure 4-53 : indicateur SKREF – signal position à $fs + fr$	199
Figure A - 1 : Photo de la carte de mesure et de mise en forme.....	211
Figure A - 2 : Caractérisation statique des voies DC 1 et 2	212
Figure A - 3 : Caractérisation fréquentielle des voies DC 1 et 2 avec $Ve=100mVpp$	213
Figure A - 4 : Caractérisation fréquentielle des voies DC 1 et 2 avec $Ve=2Vpp$	213
Figure A - 5 : Caractérisation statique des voies AC 1, 2 et 3.....	214
Figure A - 6 : Caractérisation fréquentielle des voies AC 1, 2 et 3	215
Figure B - 1 : Indicateur vibratoire arrière, Campagne N°1	217
Figure B - 2 : Indicateur vibratoire arrière, Campagne N°2.....	218

Figure C - 1 : Indicateur énergétique, signal vitesse, à 8 000 tr/min, campagne N°2	219
Figure C - 2 : Indicateur énergétique, signal vitesse, à 10 000 tr/min, campagne N°2	220
Figure C - 3 : Indicateur énergétique, signal vitesse, à 12 000 tr/min, campagne N°2	220
Figure C - 4 : Indicateur énergétique, signal vitesse, à 14 100 tr/min, campagne N°2	221
Figure C - 5 : Indicateur énergétique, signal position, à 8 000 tr/min, campagne N°2	222
Figure C - 6 : Indicateur énergétique, signal position, à 10 000 tr/min, campagne N°2	223
Figure C - 7 : Indicateur énergétique, signal position, à 12 000 tr/min, campagne N°2	224
Figure C - 8 : Indicateur énergétique, signal position, à 14 100 tr/min, campagne N°2	225
Figure C - 9 : Indicateur énergétique, signal courant statorique, à 8 000 tr/min, campagne N°2.....	226
Figure C - 10 : Indicateur énergétique, signal courant statorique, à 10 000 tr/min, campagne N°2.....	227
Figure C - 11 : Indicateur énergétique, signal courant statorique, à 12 000 tr/min, campagne N°2.....	228
Figure C - 12 : Indicateur énergétique, signal courant statorique, à 14 100 tr/min, campagne N°2.....	229
Figure C - 13 : Indicateur énergétique, signal courant onduleur, à 8 000 tr/min, campagne N°2	230
Figure C - 14 : Indicateur énergétique, signal courant onduleur, à 10 000 tr/min, campagne N°2	231
Figure C - 15 : Indicateur énergétique, signal courant onduleur, à 12 000 tr/min, campagne N°2	232
Figure C - 16 : Indicateur énergétique, signal courant onduleur, à 14 100 tr/min, campagne N°2	233
Figure C - 17 : Indicateur Kurtosis spectral, signal vitesse, à 8 000 tr/min, campagne N°2	234
Figure C - 18 : Indicateur Kurtosis spectral, signal vitesse, à 10 000 tr/min, campagne N°2	234
Figure C - 19 : Indicateur Kurtosis spectral, signal vitesse, à 12 000 tr/min, campagne N°2	235
Figure C - 20 : Indicateur Kurtosis spectral, signal vitesse, à 14 100 tr/min, campagne N°2	235
Figure C - 21 : Indicateur Kurtosis spectral, signal position, à 8 000 tr/min, campagne N°2	236
Figure C - 22 : Indicateur Kurtosis spectral, signal position, à 10 000 tr/min, campagne N°2	237
Figure C - 23 : Indicateur Kurtosis spectral, signal position, à 12 000 tr/min, campagne N°2	238
Figure C - 24 : Indicateur Kurtosis spectral, signal position, à 14 100 tr/min, campagne N°2	239
Figure C - 25 : Indicateur Kurtosis spectral, signal courant statorique, à 8 000 tr/min, campagne N°2	240
Figure C - 26 : Indicateur Kurtosis spectral, signal courant statorique, à 10 000 tr/min, campagne N°2	241
Figure C - 27 : Indicateur Kurtosis spectral, signal courant statorique, à 12 000 tr/min, campagne N°2	242
Figure C - 28 : Indicateur Kurtosis spectral, signal courant statorique, à 14 100 tr/min, campagne N°2	243
Figure C - 29 : Indicateur Kurtosis spectral, signal courant onduleur, à 8 000 tr/min, campagne N°2.....	244
Figure C - 30 : Indicateur Kurtosis spectral, signal courant onduleur, à 10 000 tr/min, campagne N°2.....	245
Figure C - 31 : Indicateur Kurtosis spectral, signal courant onduleur, à 12 000 tr/min, campagne N°2.....	246
Figure C - 32 : Indicateur Kurtosis spectral, signal courant onduleur, à 14 100 tr/min, campagne N°2.....	247

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Courant d'onduleur en fonction des courant les transistors	53
Tableau 2-2 : Contenu fréquentiel théorique des signaux Vitesse, Position et Courant de phase en mode sain ..	54
Tableau 2-3 : Récapitulatif du contenu fréquentiel des signaux étudiés en présence d'oscillation sur la vitesse .	58
Tableau 2-4 : Contenu fréquentiel des signaux de position en présence d'un décalage aimant	60
Tableau 2-5 : Contenu fréquentiel du signal capteur de position en présence d'un décalage aimant ou capteur ..	61
Tableau 2-6 : Contenu fréquentiel des signaux vitesse et capteur de position en présence d'imperfections de construction et d'une oscillation de vitesse	61
Tableau 2-7 : Contenu fréquentiel du courant statorique en présence d'imperfections de construction	64
Tableau 2-8 : Contenu fréquentiel du courant d'onduleur en présence d'imperfections de construction	65
Tableau 2-9 : Récapitulatif du contenu fréquentiel des signaux courant et position en mode sain	65
Tableau 2-10 : Harmoniques attendus dans le spectre du signal position en présence d'une oscillation de vitesse	77
Tableau 2-11 : Harmoniques de la famille $k'fr \pm fosc_i$ attendus dans le cas d'un décalage d'aimants et d'une oscillation de vitesse	78
Tableau 2-12 : Harmoniques de la famille $(6k \pm 1)fs \pm nfosc$ attendus dans le spectre du courant de phase en présence d'une oscillation de vitesse	79
Tableau 2-13 : Harmoniques de la famille $(2k + 1)fs \pm fosc$ attendus dans le spectre du signal position en présence d'un décalage capteur	80
Tableau 2-14 : Harmoniques de la famille $6kfs \pm nfosc$ attendus dans le spectre du courant d'onduleur en présence d'une oscillation de vitesse	82
Tableau 2-15 : Harmoniques de la famille $2kfs \pm fosc$ attendus dans le spectre du signal courant d'onduleur en présence d'un décalage capteur	82
Tableau 2-16 : Fréquence d'asynchronisme pour les différentes vitesses.....	84
Tableau 2-17 : Récapitulatif des différentes familles fréquentielle identifiées sur les grandeurs de l'équipement	86
Tableau 3-1 : Nombres d'enregistrements réalisés durant la campagne 1	91
Tableau 3-2 : Nombre d'enregistrements réalisés durant la campagne 2	92
Tableau 3-3 : inventaire des familles fréquentielles pour différentes vitesses de fonctionnement.....	94
Tableau 3-4 : Récapitulatif des harmoniques présents dans le spectre de la vitesse en régime défaillant à la vitesse 12 000 tr/min.....	96
Tableau 3-5 : Récapitulatif des harmoniques présents dans le spectre de la vitesse en régime défaillant pour les différentes vitesses.....	97
Tableau 3-6 : Récapitulatif des harmoniques attendus dans le spectre de la position en régime défaillant	98
Tableau 3-7 : Calcul des harmoniques attendus dans le spectre de la position en régime défaillant	99
Tableau 3-8 : Calcul des harmoniques attendus dans le spectre de la position en régime défaillant liés à la famille $k'fr \pm fosc$ (décalage des aimants) à la vitesse 12 000 tr/min	99
Tableau 3-9 : Calcul des harmoniques attendus dans le spectre de la position en régime défaillant liés à la famille $k'fr \pm fosc$ (décalage des aimants) à la vitesse 8000 tr/min	99
Tableau 3-10 : Calcul des harmoniques attendus dans le spectre de la position en régime défaillant liés à la famille $k'fr \pm fosc$ (décalage des aimants) à la vitesse 10 000 tr/min	100

Tableau 3-11 : Calcul des harmoniques attendus dans le spectre de la position en régime défaillant liés à la famille $k'fr \pm fosc$ (décalage des aimants) à la vitesse 14 100 tr/min	100
Tableau 3-12 : Récapitulatif des harmoniques attendus dans le spectre du courant statorique en régime défaillant sans défaut de calage aimants ou capteurs.....	103
Tableau 3-13 : Récapitulatif des harmoniques attendus dans le spectre du courant d'onduleur en régime défaillant sans défaut de calage aimants ou capteurs.....	105
Tableau 3-14 : Rappel : Présence des harmoniques identifiés sur le spectre de vitesse pour différentes vitesses de fonctionnement.....	110
Tableau 3-15 : Valeur moyenne du critère Rapidité sur l'ensemble des indicateurs calculés sur les fréquences fc, fr et $fr - 2fc$, pour les deux campagnes d'essais et pour différentes vitesses de fonctionnement...	131
Tableau 3-16 : Valeur moyenne du critère Ecart S/D sur l'ensemble des indicateurs calculés sur les fréquences fc, fr et $fr - 2fc$, pour les deux campagnes d'essais et pour différentes vitesses de fonctionnement...	131
Tableau 3-17 : Valeur moyenne du critère Fiabilité VA sur l'ensemble des indicateurs calculés sur les fréquences fc, fr et $fr - 2fc$ pour les deux campagnes d'essais et pour différentes vitesses de fonctionnement....	131
Tableau 3-18 : Valeur moyenne des critères intermédiaires sur l'ensemble des indicateurs calculés pour les différentes vitesses de fonctionnement, pour les harmoniques fc, fr et $fr - 2fc$, et pour les deux campagnes d'essais.....	132
Tableau 3-19 : Critère généralisé – Signal vitesse – $N = 2^{11}$	133
Tableau 3-20 : Critère généralisé – Signal position – $N = 2^{11}$	134
Tableau 3-21 : Critère généralisé – Signal courant statorique – $N = 2^{11}$	135
Tableau 3-22 : Critère généralisé – Signal courant onduleur – $N = 2^{13}$	136
Tableau 3-23 : Critère généralisé pour les différents signaux étudiés.....	137
Tableau 3-24 : Bandes fréquentielles présentant les meilleures valeurs des critères	137
Tableau 3-25 : Famille $f1, 2$ pour différentes vitesses de fonctionnement	140
Tableau 4-1 : Fréquences sensibles aux défauts de roulements pour les différentes vitesses de fonctionnement (SK vitesse)	162
Tableau 4-2 : Récapitulatif des harmoniques liés à la fréquence de cage attendus dans le SK de la position pour 12 000 tr/min	163
Tableau 4-3 : Fréquences sensibles aux défauts de roulements pour les différentes vitesses de fonctionnement (SK position)	166
Tableau 4-4 : Fréquences sensibles aux défauts de roulement pour les différentes vitesses de fonctionnement (SK courant statorique)	169
Tableau 4-5 : Fréquences sensibles aux défauts de roulement pour les différentes vitesses de fonctionnement (SK courant onduleur).....	171
Tableau 4-6 : Harmoniques de SK pour les différents signaux et les différentes vitesses en cas de défaut.....	172
Tableau 4-7 : Harmoniques de SK communs pour toutes les vitesses en cas de défaut.....	173
Tableau 4-8 : Critères de comparaison des indicateurs énergétique et SK (signal vitesse, 14100 tr/min, autour de la fréquence $fcage$)	188
Tableau 4-9 : Critères généralisés – Signal vitesse – $N = 2^{11}$	190
Tableau 4-10 : Pertinence des différentes familles d'harmoniques sélectionnés, pour l'indicateur SK de vitesse, et pour les différentes vitesses de fonctionnement ; C1 = campagne d'essais n°1 et C2 = campagne d'essais n°2	191
Tableau 4-11 : Critères généralisés – Signal position – $N = 2^{11}$	191
Tableau 4-12 : Pertinence de l'indicateur SK de position pour les différentes vitesses de fonctionnement sur les différentes familles d'harmoniques sélectionnés	192
Tableau 4-13 : Critère généralisé – Signal courant statorique – $N = 2^{11}$	193

Tableau 4-14 : Pertinence de l'indicateur SK de courant statorique pour les différentes vitesses de fonctionnement sur les différentes familles d'harmoniques sélectionnés.....	194
Tableau 4-15 : Critères généralisés – Signal courant onduleur – $N = 2^{13}$	195
Tableau 4-16 : Pertinence de l'indicateur SK de courant onduleur pour les différentes vitesses de fonctionnement sur les différentes familles d'harmoniques sélectionnés.....	195
Tableau 4-17 : Récapitulatifs des fréquences considérés les plus sensibles au défaut pour les différents signaux étudiés.....	196

Introduction générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la détection de défauts de roulements à billes dans les actionneurs à aimants permanents haute vitesse. L'application choisie est un ventilateur de conditionnement d'air utilisé dans les avions commerciaux. Notre démarche s'intègre dans une démarche plus générale nommée Health Monitoring et qui concerne la mise en place de dispositifs permettant d'assurer la surveillance de l'état de santé d'un équipement. Les informations extraites de la démarche de Health Monitoring sont ensuite destinées à être exploitées par des organes de pilotage rapprochés ou de supervision globale pour par exemple, mettre en sécurité un équipement afin d'éviter de plus graves avaries. Cette démarche rentre également dans le cadre global d'un changement des politiques de maintenance. En effet, à l'heure actuelle, les matériels sont dits « On Condition », c'est-à-dire qu'ils ne sont remplacés qu'après une défaillance majeure [1]. Le but du Health Monitoring est de pouvoir accéder à la maintenance prédictive, c'est-à-dire de prévoir l'arrivée d'une défaillance sur un équipement avant qu'elle n'entraîne des conséquences pouvant s'avérer bloquantes pour le système auquel il appartient ou dangereuses pour les personnes à proximité. Il s'agit également d'éviter des arrêts de fonctionnement imprévus et coûteux, donc de surveiller en permanence l'état des équipements afin de détecter tous les signes de défaillance. Par ailleurs, il convient également de proposer un diagnostic fiable et d'éviter les fausses alarmes, entraînant un démontage inutile et coûteux de l'équipement, puis un retour sur avion avec la mention NFF « No Fault Found ».

Le « Health monitoring » fait partie des objectifs de R&D des entreprises du secteur aéronautique, Airbus et ses équipementiers, de l'Institut de Recherche Technologique Aéronautique espace et systèmes embarqués (IRT AESE). Enfin, c'est un domaine dont l'importance croît dans les conférences et les revues universitaires du génie électrique.

Les machines électriques font de nos jours intégralement partie des équipements embarqués à bord des avions. Elles sont largement utilisées pour réaliser différentes fonctions, comme les commandes de vol, le transfert de carburant, ou, comme pour notre application, le conditionnement d'air. Les roulements à billes sont parmi les constituants les plus fragiles de ces machines tournantes [2]. Le passage répétitif des billes sur les chemins engendre de fortes contraintes mécaniques qui entraînent peu à peu une dégradation par fatigue et provoquent l'apparition de défauts ponctuels (des fissures, un écaillage des surfaces, etc...). Selon les sources bibliographiques, les défauts des roulements à billes constituent près de 40% des défauts mécaniques des machines électriques, toutes applications confondues (type de machine, niveau de puissance, vitesse de rotation...). La défaillance de ces éléments peut bien évidemment conduire à un arrêt total de la fonction réalisée par l'actionneur. Pour un ventilateur de conditionnement d'air comme celui étudié dans notre thèse, les conséquences peuvent même être plus sérieuses. Des incidents font état, suite à une défaillance des roulements, de dégagements de fumées issues du ventilateur se propageant en cabine. Ce genre d'évènement peut, comme on l'imagine, avoir des conséquences importantes en termes de sécurité des personnes. Il est à proscrire impérativement.

Le diagnostic des roulements à billes dans les machines électriques est donc devenu un axe de recherche important au cours des dernières années. La plupart des études portant sur la détection des défauts de roulements utilisent des mesures vibratoires issues de capteurs placés au plus près des éléments mécaniques à surveiller. Ce type d'instrumentation est souvent couteux et parfois difficile à mettre en place dans un équipement à fort degré d'intégration.

Un des objectifs de ce travail est donc d'étudier dans quelles mesures l'utilisation de grandeurs plus facilement mesurables, permet d'assurer dans de bonnes conditions la surveillance d'un actionneur électrique. Certaines grandeurs sont par exemple déjà disponibles dans l'équipement pour des besoins liées à la commande, comme par exemple certaines grandeurs électriques ou mécaniques. Est-il possible de les utiliser avec suffisamment de confiance pour supprimer l'analyse vibratoire ?

De plus, nous nous intéressons à la mise au point d'algorithmes de détection automatisée. Ces derniers doivent permettre de manière automatique, d'extraire des signaux prélevés sur le système, des informations permettant de mettre en évidence la présence ou l'apparition d'une défaillance. L'objectif est de pouvoir déterminer si l'objet étudié est en train d'évoluer par rapport à un état de référence, que nous nommerons état « sain », vers un état « dégradé » ou « défaillant » et quelle est la dynamique de cette évolution. Cette approche nécessite bien évidemment des connaissances préalables sur l'équipement à surveiller. Les signatures des défauts de roulements peuvent apparaître de diverses manières sur les grandeurs prélevées et la construction d'un algorithme ne peut se faire sans appréhender ces effets. Les performances des indicateurs mis au point, en termes de capacité de détection, de rapidité et de confiance, dépendront de la prise en compte de ces connaissances. Par ailleurs, les signatures de défauts réels, obtenues sur les équipements de série que nous avons testés, dépendent de nombreux paramètres tels que la vitesse de rotation, le roulement lui-même, de son vieillissement, d'éventuelles imperfections de construction de la machine... Nos algorithmes devront également s'inscrire dans une recherche de robustesse du diagnostic.

Dans le chapitre 1, nous allons présenter dans une première partie le projet PREMÉP et notre partenaire, l'entreprise SAFRAN-Technofan. Par la suite, un état de l'art sur la constitution des roulements à billes et leurs mécanismes de dégradation seront présentés. Nous introduirons également certaines spécificités liées à notre étude, comme les caractéristiques des roulements hybrides à billes céramiques qui équipent notre actionneur. Nous présentons également une étude sur l'état de l'art des indicateurs vibratoires et des indicateurs de température. Nous montrons dans cette étude la méthode de construction des indicateurs vibratoires et par mesure de température utilisée chez Technofan. Nous décrivons ensuite l'état de l'art de l'influence d'un défaut de roulements sur les courants statoriques. Finalement différentes techniques mathématiques utilisées pour la détection de défauts de roulements et leur mise en perspective par rapport à nos travaux seront présentées.

Dans le chapitre 2, une étude théorique pour la capitalisation des connaissances est menée pour identifier le contenu spectral théorique des différents signaux prélevés en régime sain. Cette étude est complétée par des simulations numériques de certains signaux afin de valider l'approche de modélisation réalisée. L'évolution du contenu spectral de ces signaux est ensuite traitée en présence d'imperfections de construction inhérentes à tout équipement. Il

s'agit pour notre cas d'imperfections liées à des décalages géométriques des capteurs de position ou d'aimants situés sur la roue polaire. L'identification des harmoniques pouvant apparaître sur les signaux étudiés est ensuite poursuivie avec la prise en compte d'harmoniques sur la vitesse de rotation. Finalement une étude des signaux expérimentaux prélevés en régime sain lors de deux campagnes d'essais longue durée a été menée chez notre partenaire industriel (SAFRAN-Technofan) pour valider la présence des harmoniques théoriquement identifiés.

Dans le chapitre 3, nous nous intéressons aux effets induits par l'introduction d'un roulement artificiellement dégradé au sein de l'actionneur. En utilisant les résultats du chapitre 2, le spectre de vitesse sera prioritairement évalué (mais aussi les courants statoriques) pour identifier les harmoniques présentant des variations d'amplitude suffisamment significatives pour distinguer régime sain et régime permanent défaillant. Nous étudions par la suite la propagation de ces harmoniques dans les spectres des différents signaux étudiés. Ensuite, l'algorithme de calcul de l'indicateur énergétique sera détaillé et les résultats obtenus lors des 2 campagnes d'essais seront présentés. Pour pouvoir étudier et classer les résultats obtenus, nous avons élaboré un ensemble de critères de performances permettant de comparer et classer les résultats obtenus. Ces critères étudient la robustesse, la reproductibilité et la bonne détection de l'indicateur pour différentes vitesses de fonctionnement. Finalement, nous étudions certaines signatures qui apparaissent dans la première campagne d'essai, et qui ne sont pas directement liées au défaut mécanique surveillé.

Dans le chapitre 4, l'originalité de nos travaux réside dans l'introduction de nouveaux outils d'analyse destinés à la construction d'algorithmes de détection, le Kurtosis et le Kurtosis Spectral. Ces outils permettent de palier certains inconvénients des indicateurs construits dans le chapitre 3 et basés sur des critères énergétiques. Nous présenterons des éléments théoriques relatifs à la définition de ces outils et donnons quelques exemples pour illustrer l'utilité du Kurtosis spectral en vue de la détection du défaut. Nous montrons par la suite les SK (Spectral Kurtosis) des signaux obtenus en cas sain et défaillant pour les différentes grandeurs étudiées. Ces résultats nous permettront de cibler le calcul des indicateurs par Kurtosis spectral sur certaines fréquences sensibles au défaut. Puis, nous introduisons le Kurtosis spectral cumulé à partir duquel nous construisons les algorithmes fournissant les indicateurs. Nous présentons alors l'analyse des campagnes d'essais avec ces méthodes et une comparaison de performances avec les indicateurs énergétiques est menée en utilisant les critères de performances mis en place dans le chapitre 3. Enfin, nous abordons dans une quatrième partie une variante de l'indicateur par Kurtosis spectral, le Kurtosis spectral avec référence. Cette technique sera utilisée pour palier certains inconvénients du SK afin d'améliorer la robustesse de l'indicateur en présence d'évènements qui ne sont pas directement liés aux défauts de roulements.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale et les principales perspectives liées à ce travail.

Chapitre 1 : Cadre général de l'étude, étude théorique des défauts de roulements

1.1 Introduction

Le Health Monitoring est un concept qui vise une politique de surveillance, de détection et maintenance planifiée des systèmes. Le but du Health Monitoring est d'anticiper les avaries importantes, d'éviter des interventions, coûteuses en temps et en argent, et de planifier une maintenance adaptée. Le Health Monitoring permet d'optimiser l'opérationnalité du système en évitant les défaillances en cours d'exploitation et de réduire le temps d'indisponibilité de l'équipement par une maintenance prédictive [3], donc en d'autres termes, d'améliorer la fiabilité des machines électriques.

D'après l'UTE (Union Technique de l'Electricité), la fiabilité est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données pour une période de temps donnée. Plusieurs enquêtes sur la fiabilité des machines électriques étudient la répartition statistique de défauts des machines électriques. Cependant ces enquêtes sont des fois contradictoire, et dans la plupart des fois les conclusions ne sont pas les mêmes :

- Suivant [2], [4], [5] et [6], la plupart des défauts sont initiés par des ruptures mécaniques, et/ou augmentation de la température. suivant [7], c'est la rupture d'isolation qui est considérée comme l'initiateur le plus prépondérant de défaut. Cependant, la plupart des initiateurs de défauts sont classés comme 'non spécifié', et donc l'origine de défaut reste inconnue.
- La cause la plus prépondérante du défaut est la présence de pièces défectueuses suivant [2], [4], [5] et [6], et la mauvaise installation suivant [2], [4], [5], et la maintenance inadéquate suivant [6].
- Les contributeurs de défaut les plus fréquents sont l'augmentation du niveau de vibration [7], [2], [4], [5] et [6] et la mauvaise lubrification [2], [4], [5] et [6]. Une partie importante de ces contributeurs est classé non spécifié, plus de 80% dans [7], 34% dans [6] et 13% dans [2], [4], [5].
- Le pourcentage d'apparition d'un défaut vibratoire augmente avec l'augmentation des dimensions de la machine [6],
- La tendance à la défaillance diminue avec l'augmentation du temps d'arrêt de la machine [6],
- La tendance à la défaillance augmente avec l'augmentation de la tension et/ou la puissance de la machine suivant [6], et diminue avec l'augmentation de la puissance suivant [8]. Suivant [2], [4], [5], il est difficile de conclure sur l'influence de la gamme de puissance,
- Le taux de défaillance est important pour les machines à vitesse moyenne suivant [6]. Cependant, il diminue avec l'augmentation de vitesse dans [2], [4], [5] et augmente avec l'augmentation de vitesse suivant [8],
- Le taux de défaillance est important pour les machines à une paire de pôles [6],
- Les défauts de roulements constituent entre 40 à 60% des défauts des machines électriques suivant différentes enquêtes.

Donc généralement nous concluons qu'il est difficile de conclure sur la répartition statistique des défauts de machines électriques. De plus, tous ces enquêtes étudient la surveillance des machines asynchrones haute puissance, connectées réseau.

En 2010, Jeevanand et al [9] ont résumés les conclusions des différentes enquêtes de surveillance de défauts de roulements des machines asynchrones avec différentes techniques de diagnostic utilisées dans la littérature.

L'amélioration des équipements de surveillance a conduit à une augmentation du temps entre deux maintenances (dite intervalle de maintenance) sans diminuer la fiabilité du service [6].

Comme plusieurs études le montrent [2], [4], [5], [8], [10], les roulements sont parmi les composants les plus fragiles des machines électriques tournantes. Le passage répétitif des billes sur les chemins engendre de fortes contraintes mécaniques qui entraînent peu à peu une dégradation par fatigue, et provoquent l'apparition de défauts ponctuels (des fissures, un écaillage des surfaces, etc...). De plus, les défauts de montage et de conception, des vibrations de l'équipement ou de son support... peuvent provoquer des surcharges qui entraînent l'usure prématurée du roulement. Enfin, comme nombre de système, le roulement est sensible à la pollution extérieure. Un environnement poussiéreux, la présence de d'impuretés dans le corps du système, des lubrifiants pollués ou une atmosphère humide... sont autant d'agents extérieurs susceptibles de causer d'importants dégâts.

Pour éviter des arrêts de production imprévus et coûteux, il faut alors surveiller en permanence l'état des roulements, et détecter tous les signes des défauts : un bruit inhabituel, des vibrations anormales, une élévation de température, etc.

La plupart des études de diagnostic des roulements utilisent des indicateurs basés sur les mesures des capteurs vibratoires [11][12][13][14]. En général le système a comme entrées les signaux de vibrations et de températures et comme sortie un indicateur qui donne une consigne de défaillance quelques heures avant la panne de la machine. La nécessité de systèmes d'acquisition des signaux issus de capteurs vibratoires entraîne un surcoût et une difficulté d'implantation matérielle supplémentaire. Notre originalité réside notamment dans l'utilisation de capteurs existants, les capteurs de courant par exemple, pour construire des indicateurs de l'état de santé des roulements. Le surcoût nécessaire à l'implantation d'une fonction de « health monitoring », sans être nul est alors seulement logiciel. Cet aspect « implantation temps réel » fait partie des perspectives de notre travail.

Notre travail de thèse est en partie inclus dans le projet PREMPEP [15] (PROJET Moteur Electronique de Pilotage) avec la participation du POLE AEROSPACE VALLEY [16], du LAPLACE [17] et des sociétés SAFRAN-TECHNOFAN [18], LIEBHERR AEROSPACE [19], CIRTEM [20], DELTY [21] et ADN [22].

L'objectif du travail est de développer des connaissances de méthodes de diagnostic, caractérisation et mode de réglage.

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons présenter le projet PREMPEP, un court descriptif des objectifs industriels des principaux partenaires, puis une présentation de l'entreprise TECHNOFAN, de ses marchés et de son historique.

Ensuite, l'état de l'art de diagnostic des défauts de roulements sera présenté, nous montrons dans cette partie des exemples de différents types de défaut de roulements, avec certaines références à des solutions proposés par un grand nombre d'auteurs. Les caractéristiques des

roulements hybrides à billes céramiques seront en particulier étudiées dans une troisième partie, ce type de roulements étant utilisé dans notre application.

Enfin, une présentation de différentes techniques mathématiques utilisées pour la détection de défaut de roulements clôturera ce premier chapitre. Nous nous intéressons aux techniques spectrales comme la FFT et le Kurtosis spectral qui seront utilisés dans la suite, en soulignant l'originalité de nos travaux. A titre de comparaison, nous présentons également les indicateurs de vibration et de température utilisés dans l'industrie Technofan comme introduction de notre travail.

1.2 Présentation du projet PREMEP

Le projet PREMEP est un projet national de recherche collaborative, appliqué aux moteurs électriques et aux électroniques de puissance pour des applications aéronautiques. L'objectif de PREMEP est de préparer de nouveaux équipements pour le nouveau réseau d'alimentation électrique (230Vac et 540HVDC). Les partenaires du projet sont: SAFRAN-TECHNOFAN, LIEBHERR, Aerospace Toulouse, LAPLACE, CIRTEM, Ateliers de Navarre et DELTY.

Les objectifs industriels de TECHNOFAN [15]

L'activité principale de TECHNOFAN est le développement du contrôle électronique des ventilateurs. Les applications sont les ventilateurs des cabines de l'avion ou les ventilateurs avioniques. Une nouvelle structure électronique a été développée pour les avions A380 et A350 en raison de la fréquence variable du réseau électrique. L'architecture matérielle nécessite d'impliquer un étage d'entrée (conversion AC / DC) et un onduleur pour alimenter la machine MSAP et de réaliser la fonction du ventilateur.

La prochaine étape dans la constitution d'avions dite plus électriques, est le réseau d'alimentation HVAC et HVDC qui fournit des nouvelles considérations matérielles. Par exemple, la structure matérielle de l'étage d'entrée doit prendre en compte la spécificité du réseau DC qui est une nouvelle approche dans l'équipement de Technofan.

Un autre intérêt est la réduction du poids de l'étage d'entrée de courant HVAC du ventilateur. Ainsi, un développement réel est axé sur l'étage d'entrée électronique pour une gamme de puissance allant jusqu'à 15kW. En effet, une grande partie du poids totale du ventilateur est due à des composants électroniques. L'étage d'entrée est un contributeur de poids important. Les différentes techniques de réduction de poids sont évaluées grâce au projet PREMEP. Le résultat n'est pas encore établi, mais l'étude préliminaire montre que la diminution du poids du circuit électrique peut être réalisée en utilisant l'alliage au lieu du cuivre émaillé.

Un autre sujet de PREMEP est le développement de nouvelles fonctions électroniques comme la fonction de surveillance et de diagnostic. Pour le futur programme de l'avion, le diagnostic a un intérêt important pour aider à l'étape de maintenance. Cette étape est de plus en plus demandée par les avionneurs. Les algorithmes de détection de défaut de roulements sont développés par le groupe de recherche Codiase de LAPLACE (ce qui fait le corps de cette thèse).

1.3 Présentation de l'entreprise

1.3.1 Le groupe SAFRAN

Fiche d'identité [23][24]:

Date de création	11 mai 2005 (fusion de Snecma et Sagem)
Forme juridique	Société Anonyme à Conseil de Surveillance et Directoire
Effectif 56.000 personnes	57 000 (Janvier 2008)
Siège	Paris, France
Branches d'activité	Propulsion aéronautique et spatiale, Equipements aéronautiques, Défense et sécurité, Communications
Implantation	31 pays
Site corporatif	www.safran-group.com
Chiffre d'affaires	12 M d'euros (2007)

Le groupe Safran est un équipementier international de haute technologie, leader en aéronautique, défense et sécurité. Présent sur tous les continents, le Groupe emploie près de 60 000 personnes et a réalisé en 2011 un chiffre d'affaires de 11,7 milliards d'euros [23]. Les activités de Safran, centrées sur les secteurs stratégiques de l'aérospatial, de la défense et de la sécurité, sont regroupées en trois grands métiers. Les principales sociétés du Groupe sont réparties dans l'un de ces trois métiers selon leur domaine d'activité[23].

- *Propulsion aéronautique et spatiale : Snecma, Turbomeca, Snecma Propulsion Solide, Techspace Aero et SME.*
- *Equipements aéronautiques : Messier-Bugatti-Dowty, Aircelle, Labinal et Hispano-Suiza.*
- *Défense – Sécurité : Sagem et Morpho.*

Au sein de ce groupe, TECHNOFAN, compte environ 190 salariés à l'heure actuelle dont 32% de cadres, 37% de personnel qualifié et 30% d'agents de production. Constitué de près de 57 000 personnes et représentant un chiffre d'affaires de près de 12 milliards d'euros répartis selon la figure 1-1, SAFRAN dispose d'un fort potentiel de croissance dans toutes ses activités. Dès sa création, il se place comme l'un des principaux groupes de l'industrie aérospatiale et militaire au monde.

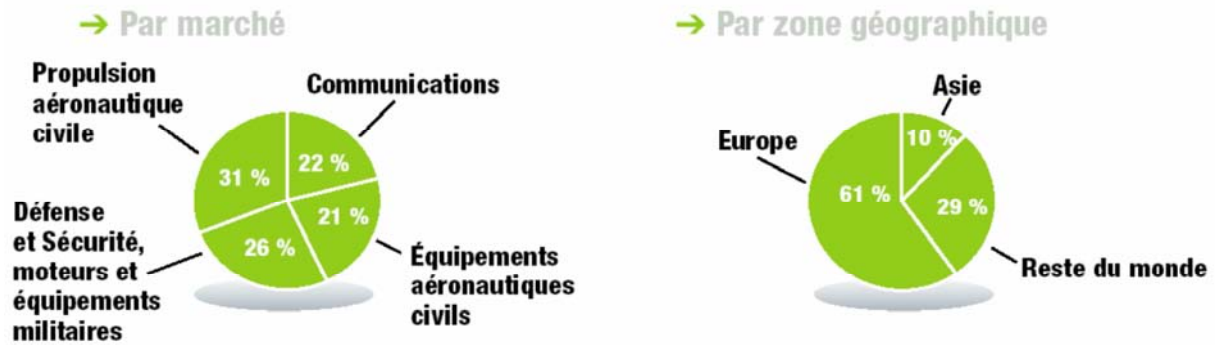


Figure 1-1 : Répartition du chiffre d'affaire du groupe SAFRAN[3]

1.3.2 La société TECHNOFAN

Technofan, filiale du Groupe Safran, occupe une place prépondérante dans le secteur de la ventilation haute performance appliquée à l'aéronautique et l'armement.

Technofan fournit notamment l'ensemble des équipements de ventilation avionique et de freinage sur la gamme des avions commerciaux Airbus de plus de 100 places. Technofan est également présent depuis de nombreuses années, sur le marché des avions régionaux en fournissant l'ensemble des équipements de ventilation (ventilateurs, vannes) sur les principaux programmes (Bombardier Aerospace, Embraer, ATR ...)

Technofan équipe les avions militaires (Dassault), les avions d'affaires (Falcon, Cessna, Bombardier Aerospace), les hélicoptères civils et militaires (Agusta, Eurocopter) et poursuit sa présence sur le marché militaire terrestre.

Les principaux axes de recherche

Technofan mène une politique de recherche et développement continue sur ses métiers de base que sont l'aérodynamique, l'acoustique, la mécanique, les moteurs électriques, l'électronique de puissance et le logiciel de contrôle moteur.

Technofan répond aux grandes évolutions technologiques en cours, liées à une conception de l'avion "plus électrique". L'abandon par les avionneurs du réseau 200 volts 400Hz fréquence fixe sur les avions gros porteurs, s'est traduit pour Technofan par la montée en puissance de nouveaux métiers comme l'électronique de puissance et le logiciel.

Technofan participe à de nombreux programmes de recherche régionaux, nationaux et européens en collaboration avec les grands acteurs de l'aéronautique. Elle bénéficie dans ce cadre de l'appui des sociétés du groupe SAFRAN, leader dans le domaine des turbomachines, notamment Turbomeca et Snecma moteurs.

Les produits et les marchés [3]

Les systèmes aérauliques de la société TECHNOFAN occupent une place importante sur plusieurs segments majeurs du marché. Tout d'abord, TECHNOFAN produit des ventilateurs basse pression, dont quelques exemples sont donnés en figure 1-2, pour application sur aéronefs civils et militaires ou sur véhicules blindés (systèmes de conditionnement d'air, de refroidissement de baies électroniques, de refroidissement d'huile et d'eau).

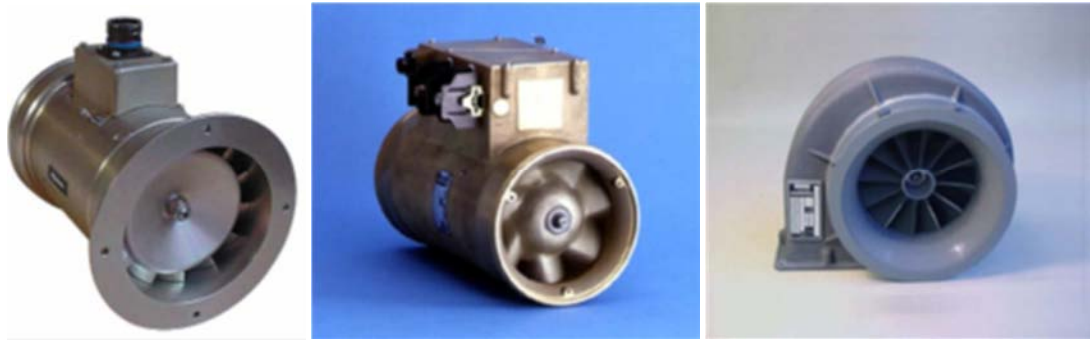


Figure 1-2 : Ventilateurs basse pression [3]

TECHNOFAN fournit également les ventilateurs de refroidissement des freins pour avions commerciaux (figure 1-3), dont sont équipés les avions d'AIRBUS et le B777 de BOEING.



Figure 1-3 : Ventilateurs de refroidissement des freins [3]

Les vannes de distribution d'air basse pression (figure 1-4), permettant l'orientation des flux d'air, sont aussi fabriquées par TECHNOFAN.

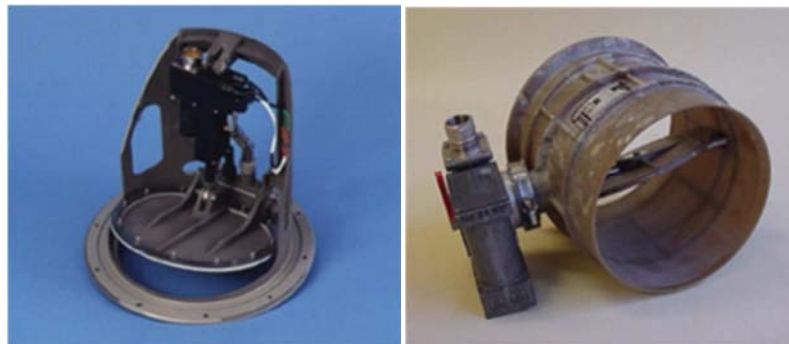


Figure 1-4 : Vannes de distribution [3]

Système de ventilation de la baie avionique A380 [18]

Technofan a conçu le système de ventilation avionique complet, pour une nouvelle génération d'avions de plus de 100 places, qui fournit la ventilation forcée pour le refroidissement des différents systèmes électroniques. Le système de ventilation comprend 2 circuits séparés dont chacun intègre un ventilateur, un filtre à air, un capteur de température et une vanne de 'back-up'.

L'extraction d'air est assurée par un ventilateur qui dissipe la chaleur des systèmes avioniques au travers de 2 modes de fonctionnement : en vol par la vanne 'inboard', au sol par une vanne 'overboard'. Le calculateur de ventilation avionique est connecté à l'ensemble des équipements du système et assure le contrôle, le pilotage et les tests de fonctionnement.

Nous montrons sur la figure 1-5 le système de ventilation avionique, avec la figure du ventilateur LP2 qui fera le sujet de notre application.

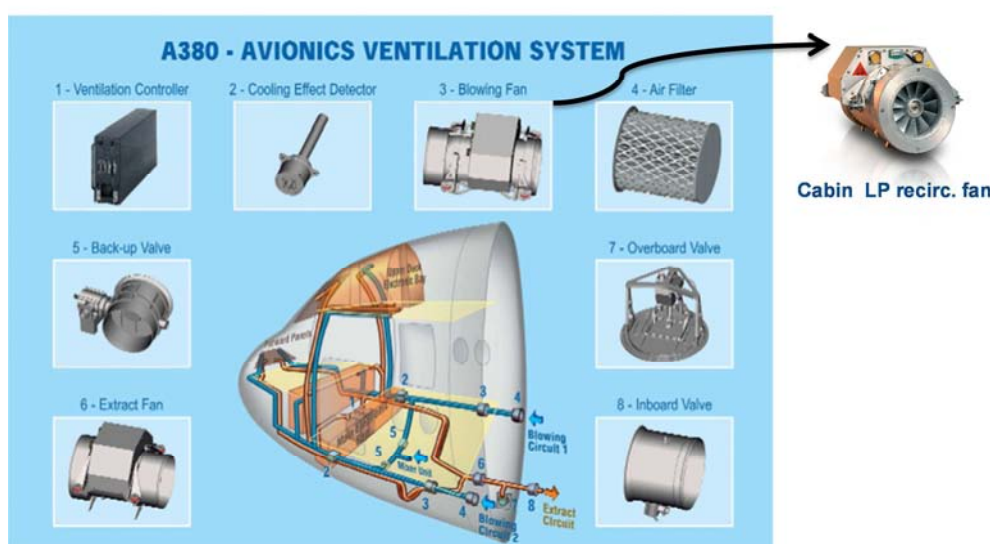


Figure 1-5 : système de ventilation avionique et ventilateur LP2 [18]

1.4 Maintenance

Le fonctionnement d'une installation, même dans des conditions normales entraîne un certain vieillissement des matériels et parfois même des incidents ou accidents. Il est nécessaire pour en assurer une exploitation correcte de maintenir cette installation en bon état. Il importe de trouver le niveau optimum de maintenance qui maintiendra au moindre coût, l'installation à niveau sans mettre en danger la sécurité des personnes. Comme illustré [25], le nombre d'incidents et leur coût croissent à mesure que se réduit le niveau de maintenance. À l'inverse, trop de maintenance préventive augmente le coût total. La maintenance optimale est donc un mélange harmonieux d'entretien préventif systématique et d'entretien correctif comme le montre la figure 1-6.

De manière générale, il existe trois types de maintenance [26]:

- la maintenance préventive ou systématique, qui répond aux exigences d'un échéancier entraînant des actions d'inspection et de contrôle puis des réparations si nécessaire,
- la maintenance corrective, effectuée en cas de panne du système,
- la maintenance prédictive ou conditionnelle, liée à la surveillance et au diagnostic du système et n'entraînant d'action de réparation que si une panne (présente ou future) est détectée, qui est l'un des objectifs visés par notre étude.

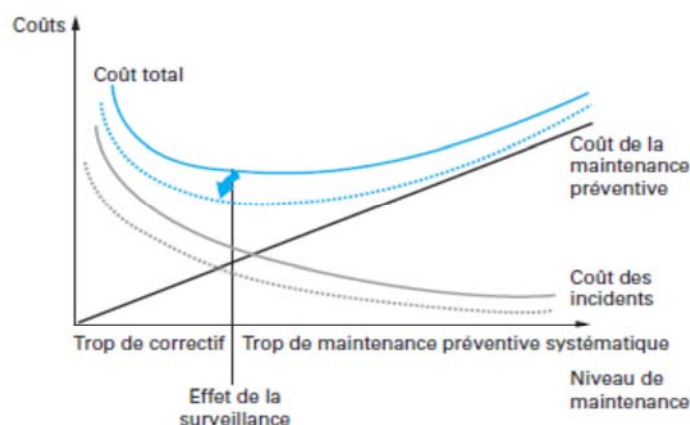


Figure 1-6 : coût de maintenance [25]

Parmi plusieurs études sur la maintenance en présence de défauts de roulements, nous citons :

Hsuan-Wen Peng et Pei-Ju Chiang [27] ont enquêté sur le diagnostic des défauts de roulements à billes des moteurs asynchrones triphasés. Les auteurs ont comparé l'utilisation de l'algorithme de forêt et l'arbre de décision C4.5. Les résultats expérimentaux montrent l'avantage de l'algorithme de forêt et sa capacité pour classer efficacement les états du roulement à billes.

Shuang Lu, Fujin Yu et Jing Liu [28] ont présenté une nouvelle méthode pour le diagnostic de défauts de roulements basée sur la transformé K-L et la (SVM) en utilisant la théorie d'apprentissage statistique et l'analyse des caractéristiques de signal vibratoire (extraction et classification) du roulement à billes.

Ruqiang Yan et Gao [29] ont enquêté sur l'utilisation de l'Entropie Approximative (ApEn) pour la diagnostic de santé des machines électriques. Comme une mesure statistique pour les signaux dans le domaine temporel, l'Entropie Approximative (ApEn) quantifie la régularité d'un ordre de données et peut ainsi servir d'indicateur pour la sévérité de défauts de roulements.

Aucune des techniques utilisées n'est pas justifiée pour le cas d'une machine synchrone à aimant permanent comme dans notre application. Nous remarquons la large variation des solutions proposées par les auteurs, mais nous remarquons aussi la limitation des applications à un seul type de machine.

1.5 Surveillance des matériels

L'utilisation de la surveillance doit prédire (et donc aider à l'évitement) les pannes d'équipement imprévues. Les avantages d'utiliser la surveillance sont significatifs, en opérant essentiellement dans un mode de maintenance réactif (ou même essentiellement de maintenance préventive). La surveillance offre une vue globale de condition d'équipement, qui peut aider à la maintenance 'planifiée', en donnant des informations sur l'état de santé des composants de la machine avant l'arrivée de panne(s) [25]. L'enjeu principal est d'optimiser la phase de surveillance et minimiser le coût de la maintenance. Ceci s'intègre dans la politique de maintenance et doit assurer :

- **la prévention** des risques majeurs (arrêt des machines) lorsque les conditions de sécurité (pour l'homme ou pour la machine) ne sont pas satisfaites,
- **la détection** précoce des anomalies, pour éviter au maximum les avaries en remplaçant les composants défectueux si possible avant incident et au meilleur moment,
- **l'analyse après incident**, pour remédier aux défauts constatés, éviter de les retrouver à l'avenir, ou définir les modifications nécessaires.

1.6 Généralités sur les roulements à billes

La figure 1-7 représente le pourcentage de défauts sur les différents éléments des machines asynchrones suivant la référence [30], basé sur les résultats de plusieurs enquêtes. Les défauts des roulements à billes constituent 40% des défauts mécaniques des machines électriques suivant [2], et 52% suivant [6]. Le diagnostic des roulements est donc devenu un axe de recherche important au cours des dernières années. Il convient de souligner néanmoins dans ces études, la grande diversité des machines (asynchrones, synchrones), des modes de fonctionnement (moteurs, génératrices), d'alimentation (connexion réseau ou alimentation par MLI), de fréquence (50Hz, 60Hz ou MLI), des puissances, du nombre de pôles, des vitesses de rotation, des environnements ou des types d'applications (pompage, ventilation, levage, transbordement, génération électrique...). Il n'existe pas à notre connaissance, d'étude générale sur les défauts des machines ou sur les applications aéronautiques traitées dans notre travail. L'extrapolation directe des résultats bibliographiques est donc délicate sur le plan numérique.

En regard, grande est également la variété des solutions de diagnostic proposées par les auteurs. La plupart de ces solutions sont limitées à certaines applications, les autres sont limitées à un seul type de défaut (comme par exemple [31] pour la détection des barres cassées, [32] pour la détection de défaut de court-circuit dans les machines asynchrones, [33] pour la détection de défaut de désalignement). Nous remarquons aussi que la plupart des solutions sont limitées aux machines asynchrones connectées réseau.

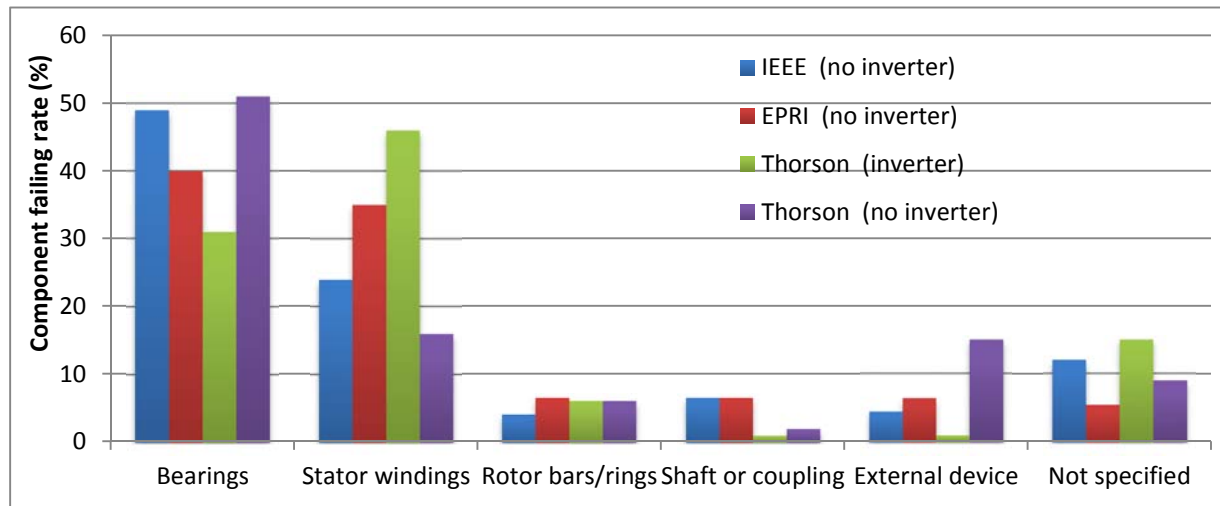


Figure 1-7 : Pourcentage de défauts sur les différents éléments des machines asynchrones [30]

1.7 Conception des roulements à billes

Le modèle de roulement le plus courant dans les machines à puissance moyenne (de 2 à quelques kw) est un roulement constitué de 4 parties essentielles (figure 1-8): une bague extérieure (1), une bague intérieure (5), une cage (3) et une rangée de billes (2) à contact radial. Les billes sont les éléments roulants du roulement, habituellement en acier, ou en céramique pour les roulements hybrides. Les roulements sont conçus de telle manière que les billes effectuent simultanément une rotation autour de leur propre axe et autour de l'axe des pistes. Le contact entre les billes et les bagues est ponctuel.

La cage maintient les billes à égale distance les unes des autres, tout en les retenant à l'intérieur du roulement. Elle ne supporte pas directement les efforts appliqués au roulement. Les types de cage varient en fonction de leur fabrication (en tôle emboutie, usinée, massive acier ou laiton, polyamide injecté).

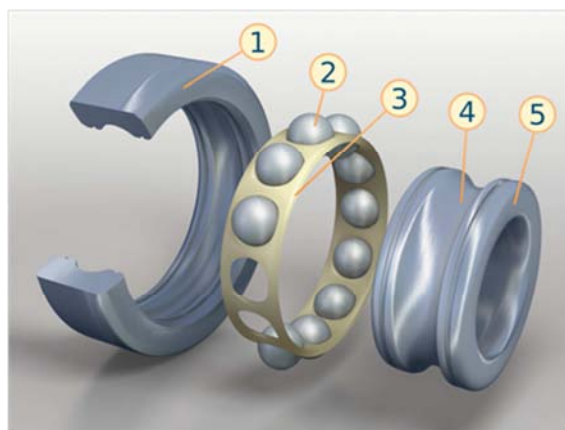


Figure 1-8 : Principaux éléments d'un roulement à billes [34]

Les roulements à billes sont classés en différentes catégories suivant la forme de leur bague (roulements à billes à gorge profonde, à contact oblique, à rotule sur billes et butées à billes).

1.8 Caractéristique des roulements à billes

En générale, les roulements à billes acceptent à la fois des charges radiales et des charges axiales (figure 1-9). Leur utilisation à basse (-20°) comme à haute température (jusqu'à 120°) est possible [35] (100° suivant [36]). La rigidité de ces roulements peut être augmentée par une précharge consistant à contraindre axialement les roulements pour forcer tous les éléments roulants à prendre une surface de contact maximale avec les pistes. Le graissage est simple, la quantité de graisse consommée très faible et le couple de frottement au démarrage est plus faible comparé à d'autre type de roulements, et de plus n'est que légèrement supérieur au couple de frottement dynamique [35]. Les roulements à billes sont fabriqués suivant des normes internationales, et interchangeables et facilement disponibles [37].

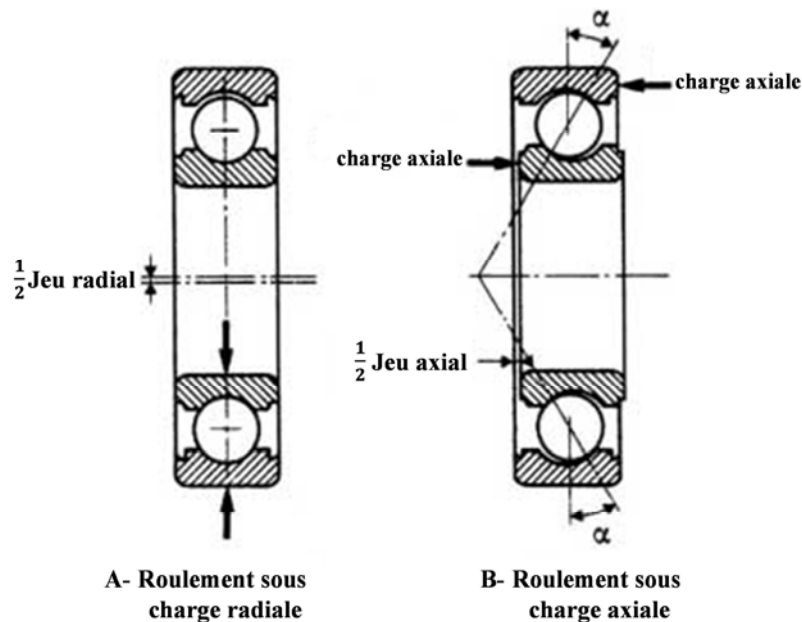


Figure 1-9 : Roulement à billes sous charge axiale et radiale [38]

1.9 Origines des défaillances des roulements à billes

Dans des conditions normales de fonctionnement, la rupture par fatigue commence par des petites fissures, qui peu à peu se propagent en générant des vibrations détectables [39]. Après un certain temps, la propagation de ces fissures cause la production d'un des phénomènes de fatigue localisée appelé écaillage ou effritement (voir figure 1-10). Une fois le processus démarré, la zone touchée s'étend rapidement en contaminant le lubrifiant et en provoquant des surcharges localisées sur toute la circonférence de la bague [40]. Finalement, un mécanisme d'usure n'intervient seul qu'au début de son présence, et il conduit à l'intervention d'autres mécanismes au cours du temps [41].



Figure 1-10 : Ecaillage des roulements [42]

Bien que ce soit le mode normal d'une défaillance des roulements, il existe beaucoup d'autres conditions qui causent la défaillance comme la corrosion, la lubrification inadéquate, la mauvaise installation, etc.... Dans la suite de ce chapitre, nous allons étudier ces mécanismes séparément, en s'intéressant à leurs effets sur la dégradation du roulement.

1.9.1 La contamination

La contamination souvent accélère la défaillance du roulement en raison des environnements durs présents dans la plupart des milieux industriels [39]. La saleté (poussière et sable) et autres matières étrangères qui sont souvent présentes dans les milieux industriels contaminent souvent la lubrification des roulements. La nature abrasive de ces minuscules particules provoque des actions de piquûres et de ponçage qui cèdent à l'usure mesurable des billes et des bagues [43]. La figure 1-11 montre quelques exemples de l'effet de la contamination sur les roulements [42].



Figure 1-11 : Effets sur les pistes de roulements de contaminations du lubrifiant [42]

1.9.2 La corrosion

La corrosion est produite par la présence d'eau, d'acides et/ou de lubrifiants dégradés [39]. Une fois la réaction chimique suffisamment avancée, les particules sont dispersées ; il en résulte la même action abrasive produite par la contamination de roulements. Nous montrons sur la figure 1-12 quelques exemples de l'effet de la corrosion sur les roulements [42].



Figure 1-12 : Effets de la corrosion de roulements [42]

1.9.3 La lubrification inadéquate

La mauvaise lubrification inclut à la fois le manque et l'excès de lubrifiant. Dans les deux cas, les conditions de rotation des billes sont dégradées, causant une augmentation de température. La chaleur excessive réduit la capacité des graisses à lubrifier le roulement et donc accélère le processus de rupture. La figure 1-13 montre quelques exemples de l'effet de la lubrification inadéquate sur les roulements [42].



Figure 1-13 : Effet de la lubrification inadéquate de roulements [42]

Boskoski [44] a étudié l'effet d'une lubrification inadéquate sur les roulements, en utilisant l'analyse cyclo-stationnaire et le Kurtosis spectral pour la sélection d'une bande de fréquences dans laquelle les variations dans les dessins de vibration sont plus fortement exprimées. L'approche a été évaluée sur un jeu d'essais comprenant 63 moteurs électriques sains et 21 avec des roulements lubrifiés d'une manière malséante. Les résultats révèlent que la lubrification impropre est exprimée par une augmentation des amplitudes des composantes spectrales liées aux fréquences caractéristiques de la cage et des billes.

1.9.4 Défauts de montage

Les défauts de montage sont souvent causés par un forçement du roulement sur l'arbre ou dans son logement, ce qui produit des dommages physiques et des désalignements qui conduisent à une défaillance prématurée. Nous montrons sur la figure 1-14 quelques exemples de l'endommagement physique créé par le défaut de montage du roulement [42].



Figure 1-14 : Endommages physiques créés par le défaut de montage de roulements [42]

1.9.5 Effets des contraintes mécaniques

Les roulements subissent des contraintes mécaniques radiales et axiales. Les contraintes axiales apparaissent plus particulièrement en présence d'un dispositif appliquant une poussée ou une traction dans l'axe de l'arbre de rotation. Les contraintes radiales s'exercent sur la bague interne du roulement qui les transmet à la bague externe par l'intermédiaire des billes [26]. Ainsi, les contraintes radiales ne s'exercent pas en un seul point de la bague externe mais se répartissent dans presque 150° de la moitié inférieure de celle-ci, comme le schématise la figure 1-15 [42].

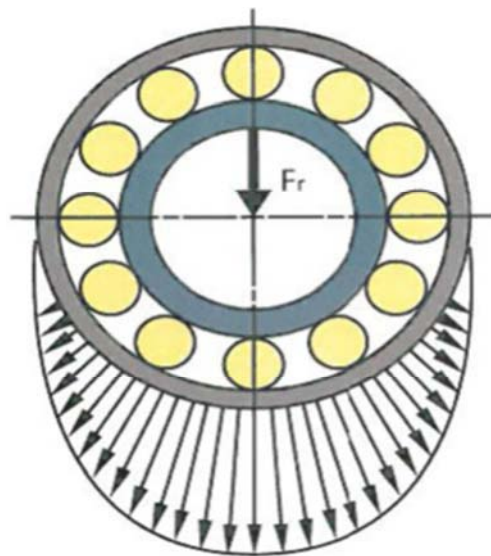


Figure 1-15 : Répartition des contraintes radiales sur les bagues interne et externe du roulement [42]

Dans cet exemple, la contrainte radiale exercée sur la bague interne est symbolisée par la force F_r . Pour un roulement fixé dans un ventilateur, la bague interne est rotative alors que la bague externe est fixe. La zone de charge couvre donc la longueur totale de la piste de roulement interne et ne couvre qu'un arc de 150° de la piste de roulement externe (cf. figure 1-16-a [42]). Par ailleurs, les efforts exercés au niveau des points de contact se répartissent au sein des matériaux en une contrainte de compression et une contrainte de cisaillement. La contrainte de compression est maximale au point de contact bille-bague et décroît avec la profondeur dans le matériau. La contrainte en cisaillement est très faible au point de contact, augmente, présente un maximum puis décroît avec la profondeur [38].

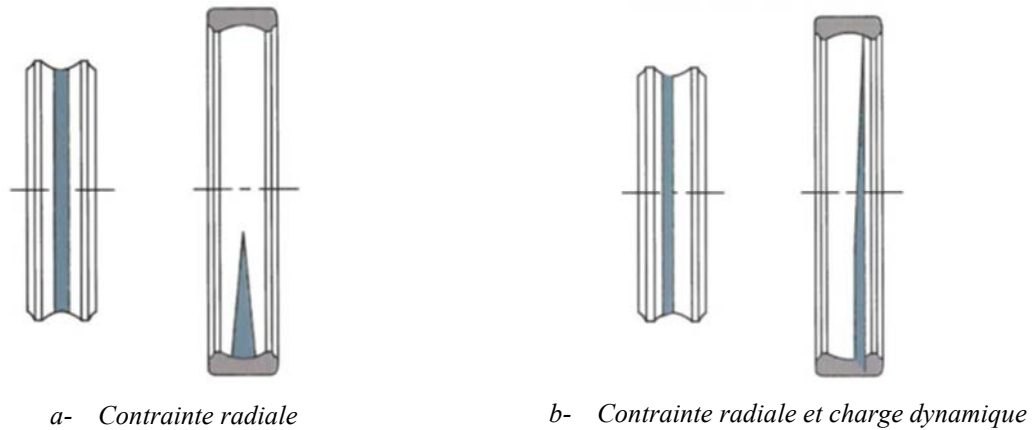


Figure 1-16 : zone de charge des bagues internes et externes en présence des contraintes mécaniques [42]

Nous montrons sur la figure 1-16-b la schématisation de l'effet des contraintes radiales combiné avec la présence d'une charge dynamique. Dans ce cas la zone de charge exercée sur les bagues interne et externe est décentrée, grâce à la présence de la charge dynamique [42]. Lorsque les efforts exercés sont trop importants, le roulement est surchargé et des criques et fissures internes sont produites, voire un écaillage des pistes de roulement ou des billes si les efforts sont cycliques [26]. La dégradation du roulement est alors considérée comme mortelle. La figure 1-17 [42] montre les dégradations sévères que peuvent provoquer des surcharges mécaniques.



Figure 1-17 : dégradations dues à des surcharges mécaniques [42]

1.9.6 Circulation de courants électriques

Les roulements étant métalliques, un courant électrique peut circuler de la bague externe à la bague interne via les billes. Le film de lubrifiant présent au niveau des contacts crée cependant une isolation électrique mais entraîne également l'apparition d'une capacité diélectrique. Par ailleurs, la multiplication des alimentations de type onduleur à modulation de largeur d'impulsions (MLI) favorise la création d'un courant de fuite homopolaire circulant depuis le stator de la machine vers le rotor via les roulements [26]. Le potentiel homopolaire se retrouve aux bornes de la capacité diélectrique engendrée par le film de lubrification. Lorsque ce potentiel est trop important, un phénomène de décharge diélectrique se produit. Ces décharges conduisent à l'apparition de micro trous sur les surfaces de roulement aux points de décharge, ou encore à l'apparition de stries perpendiculaires au sens de roulement dans les cas les plus sévères, comme le montre la figure 1-18. Pour éviter ce phénomène, des

roulements céramiques hybrides ont été développés, c'est-à-dire que le matériau constituant les billes est une céramique fortement isolante : le nitrure de Silicium Si_3N_4 . La céramique des billes étant plus dure que l'acier des bagues, de nouveaux phénomènes d'usure sont apparus et les mécanismes de fatigue des matériaux ont été modifiés [45][46]. Ainsi, dans les roulements hybrides en présence de contaminant, la détérioration de l'état de surface des bagues en acier est plus prononcée qu'avec des roulements entièrement en acier [47]. Cependant, ces roulements sont plus coûteux que les roulements tout acier et restent, malgré leurs bonnes propriétés isolantes, confinés à des applications spécifiques comme les hautes vitesses par exemple.



Figure 1-18 : influence de circulation du courant électrique [42]

1.10 Les roulements hybrides

Les roulements utilisés dans notre application sont des roulements hybrides, les billes sont en céramique plutôt qu'en acier, ce qui présente des caractéristiques physiques différentes et donc des phénomènes de défaillance différents. L'avantage de l'utilisation de ce type de roulements s'explique par l'augmentation de la dureté et de l'isolation électrique.

Le roulement hybride est construit avec des bagues intérieures et extérieures en acier au chrome (100c6) ou en acier inoxydable (SUS 440C). Les billes habituellement en acier, sont remplacées par des éléments roulants en céramique [48]. Ce type de montage permet une vitesse de rotation du roulement hybride bien plus importante que celle permise par le roulement conventionnel. Les machines modernes tournant de plus en plus vite, exigent des composants fiables. Dans le roulement hybride en céramique, les billes sont en nitrure de silicium (Si_3N_4), ce qui offre une longue liste de caractéristiques de loin supérieures à celles des roulements classiques. A cet égard, Qiang He [49] a étudié les caractéristiques dynamiques des roulements à billes céramique, en faisant des comparaisons entre les billes céramiques et les billes en acier, pour différents vitesses de fonctionnement, différentes températures et différents niveaux de vibration. Les résultats montrent certains avantages des roulements hybrides, comme l'amélioration de la limite de vitesse de fonctionnement, de la rigidité et de la température maximale.

Tiebin Yang [50] a développé une technologie de traitement d'image pour inspecter les défauts de surface des billes céramiques, qui affectent la rigidité et la durée de vie des billes céramiques. Une brève revue des technologies d'évaluation des défauts sur les roulements hybrides à billes céramiques a été également présentée.

Nous montrons dans le tableau suivant quelques propriétés de l'acier et de la céramique [51].

Propriété	Acier	Céramique	Différence
Densité (g/cm ³)	7,6	3,2	-58% plus léger
Dureté (daN/mm ²)	700	1550	+121% plus dur
Elasticité	190	320	+68% plus rigide
Coefficient d'expansion thermique	12,3	2,9	-76%
Température maximale °C	320	1000	+680°C
Rugosité de la surface (R _a)	0,02	0,0005	+75% plus lisse
Durée de vie	-	10X	10 fois plus longue

La vitesse de rotation maximale des roulements hybrides est de 30 à 50% plus élevée qu'avec un roulement classique, et avec moins de lubrification. Ceci est dû à une réduction de la force centrifuge en raison de la différence de poids (moins 40%) de la céramique. L'accélération supportable est également plus forte [48][51].

Les billes de nitrure de silicium ont une résistance à la déformation 50% supérieure aux billes en acier (résistance à la déformation), ce qui donne 15 à 20% de rigidité en plus, tout en améliorant la précision [48][51].

Les billes en céramique ont une meilleure finition que les billes en acier, la vibration du jeu interne du roulement est réduite, la vitesse de rotation maximale tolérable est plus élevée. La qualité de production est donc globalement améliorée [48][51].

Les roulements à billes hybrides en céramique sont vraiment antifriction. La dissociation de matière des billes en contact avec les pistes des bagues permet d'annuler les microsoudures aux points de contacts des éléments roulants, diminuant le stress-matière à haute vitesse et l'élévation de température. Le frottement intérieur ainsi réduit, le roulement consommera moins de lubrifiant, donc moins d'énergie. Moins de vibrations diminue également le niveau sonore et prolonge la vie du roulement, abaissant les frais d'exploitation et augmentant la productivité. Les températures de fonctionnement étant abaissées, l'environnement de travail est amélioré [48][51].

Le faible coefficient de dilatation thermique permet aux roulements hybrides avec billes céramiques de subir de plus petits changements d'angle de contact, réduisant ainsi les variations de charge initiale, améliorant la durée de vie du roulement en maintenant ses capacités de précharge [48] [51].

La piqûre de corrosion électrique dans le chemin de billes est causée lorsque le courant traverse les billes via l'effet diélectrique créé par le film d'huile. Les billes céramiques étant isolantes, cet effet d'usure est annulé. Ce cas est fréquent dans les applications des moteurs électriques [48] [51].

Avec leurs nombreux avantages, et dans la plupart des applications, les roulements hybrides à billes céramiques ont une durée de vie 5 à 10 fois supérieure aux roulements en acier classique [48] [51].

Mais l'usure de ce type de roulements présente certains phénomènes différents. En effet, le premier signe de dégradation est l'usure par fatigue des billes céramiques [46]. Ce phénomène sera suivi par l'injection des cristaux microscopiques de Nitrure de Silicium (matériau composant des billes céramiques) dans le roulement, ce qui provoque un phénomène d'abrasion au niveau des billes, même quand le nombre de particules injectées est faible. Ce phénomène conduit ensuite à l'écaillage des billes [45]. Lorsque le nombre de particules injectées devient important, l'injection de ces particules peut encore créer un phénomène d'indentation suivi d'un phénomène d'érosion et de fissure sur les bagues du roulement. Il peut alors être constaté des stries et des rayures sur toute la longueur des pistes de roulements des bagues si les efforts appliqués sont faibles ou des fissures perpendiculaires au sens de roulement dans le cas d'efforts importants. Ces fissures ont également tendance à s'aggraver avec la répétition des cycles de charge-décharge impliquant par la suite un arrachement très important de métal pouvant aller jusqu'à la ruine du roulement [26].

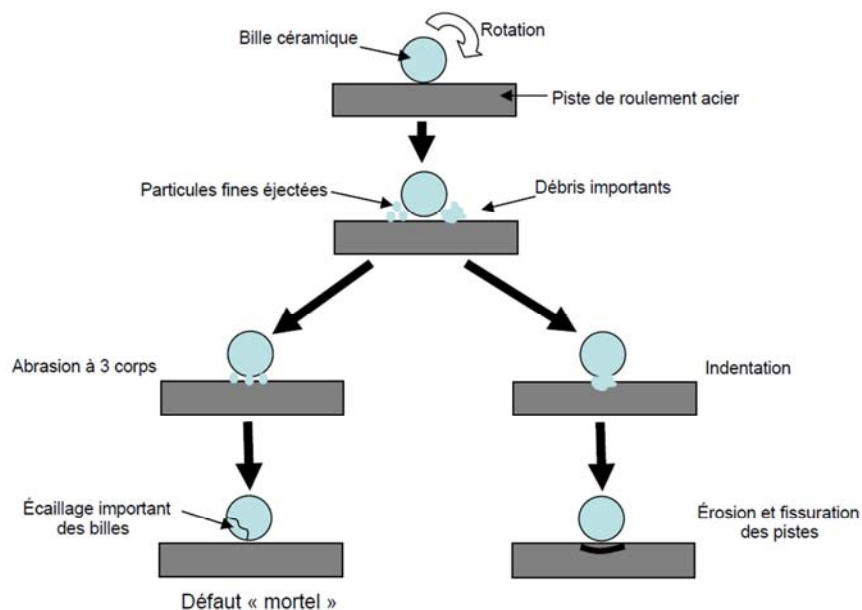


Figure 1-19 : Mécanismes généraux d'usure des roulements hybrides [26]

Quel que soit le mécanisme de rupture, les roulements défectueux génèrent des vibrations mécaniques dont la détection est possible dans le spectre de vibration. Dans la suite, nous étudions la classification des défauts des roulements suivant la possibilité ou non de les détecter.

1.11 Classement des défauts de roulements

Les études récentes catégorisent les défauts de roulements en deux catégories : les défauts localisés (single point defect) et les défauts non localisés (generalized roughness). Les premiers auteurs qui proposent de séparer les défauts suivant la possibilité de les détecter étaient J.R.Stack et T.G.Habetler en 2003 [52]. Wei Zhou et al [53] ont réétudié les différentes techniques de détection de défaut par le courant statorique en se basant sur cette classification. A partir du 2007 plusieurs auteurs [54][55] ont proposé des méthodes de diagnostic des roulements en se basant sur cette caractérisation.

Pour maintenir la sécurité et la fiabilité des machines étudiées, une technique de surveillance doit être capable de détecter à la fois les défauts présents dans ces deux catégories. Dans les deux cas, le défaut affecte directement les signaux vibratoires de la machine, mais de façon différente. Ces effets se traduisent souvent sur le stator du moteur. Les méthodes que nous développerons dans notre travail devront diagnostiquer les défauts quel que soit leur type.

1.11.1 Les défauts localisés

Les défauts localisés sont des défauts qui apparaissent sur un seul élément du roulement. Chaque fois qu'une bille du roulement passe sur une zone endommagée, une impulsion de choc est générée, ce qui conduit à des perturbations de couple et à des fluctuations de vitesse. Ces chocs périodiques provoquent l'apparition de fréquences de défauts caractéristiques déterministes bien connues, selon les données mécaniques du roulement à billes [56][57]:

$$\begin{aligned}
 f_{int} &= \frac{f_r}{2} N_b \left(1 + \frac{D_b \cos \theta}{D_c} \right) \\
 f_{ext} &= \frac{f_r}{2} N_b \left(1 - \frac{D_b \cos \theta}{D_c} \right) \\
 f_{bille} &= \frac{f_r}{2} \frac{D_c}{D_b} \left(1 - \left[\frac{D_b \cos \theta}{D_c} \right]^2 \right) \\
 f_{cage} &= \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{D_b \cos \theta}{D_c} \right)
 \end{aligned}
 \tag{1-1}$$

- f_{int} : Fréquence caractéristique de la bague interne,
- f_{ext} : Fréquence caractéristique de la bague externe,
- f_{bille} : Fréquence caractéristique des billes,
- f_{cage} : Fréquence caractéristique de la cage,
- N_b : Nombre de billes,
- D_b : Diamètre d'une bille,
- D_c : Diamètre de la cage,
- θ : Angle de contact, il indique la direction de la force que les billes exercent sur la bague extérieure.

En cas de présence d'un défaut localisé sur l'un des éléments du roulement, l'énergie focalisée à la fréquence caractéristique de cet élément dans le spectre de vibrations doit augmenter, ce qui permet de détecter le défaut et de connaître l'élément affecté par le défaut afin de le réparer ou de prendre la décision d'arrêt de la machine suivant la gravité du défaut.

Les défauts mécaniques autres que les défauts de roulements se manifestent généralement sur des multiples ou des sous-multiples de la fréquence de rotation [57] de la machine. Un tableau contenant les différentes familles de fréquences pour différents types de défauts est présenté dans [58]. Les roulements utilisés dans notre application sont caractérisés par :

	N_b (billes)	D_b (mm)	D_c (mm)	θ (degré)
Roulement avant	8	6.75	28.5	17
Roulement arrière	7	5.95	22	17

Nous montrons dans le tableau suivant les différentes fréquences caractéristiques à la vitesse 12 000 tr/min. Notons que les valeurs de ces fréquences sont proportionnelles à la vitesse.

	f_{int} (Hz)	f_{ext} (Hz)	f_{bille} (Hz)	f_{cage} (Hz)
Roulement avant	981	618	801	77
Roulement arrière	881	518	690	74

1.11.2 Les défauts non localisés

Les défauts non localisés sont caractérisés par une dégradation globale mais pas forcément homogène des roulements, ils mènent à une large bande de changements dans le spectre de vibrations. Ce type de défaut affecte toute la surface du roulement et le palier devient rugueux, irrégulier, déformé et la surface du roulement entier sera détériorée. Les défauts non localisés ne produisent pas de fréquences prévisibles pouvant être détectées dans les signaux de vibrations [59], mais ils produisent des changements imprévisibles dans les vibrations des machines et dans les courants statoriques. Ce type de défaut est la cause la plus fréquente de défaillance des roulements dans les applications industrielles [59], en raison d'une grande variété de causes telles que [60]:

- la contamination du lubrifiant, le manque ou la perte de lubrifiant,
- le désalignement (voir figure 1-20),
- la corrosion de roulements qui est produite par la présence d'eau et d'acides,
- la manipulation imprudente au cours des installations,
- les conditions environnementales (poussière, eau, acide et l'humidité...).



Figure 1-20 : Présence des défauts non localisés sur les roulements [42]

Ces causes provoquent des actions de piquûre et de ponçage qui conduisent à des usures mesurables des billes et des roulements et produisent des défauts non localisés, mais peuvent également produire des défauts localisés. Il pourrait être facile à reconnaître que des problèmes existent dans un roulement qui a un défaut non localisé car il tourne « plus difficilement » [60]. L'augmentation du bruit et les vibrations sont des symptômes typiques des roulements endommagés.

De par la non stationnarité des phénomènes, la détection de défauts pour cette catégorie n'est plus possible par la simple surveillance de quelques fréquences caractéristiques. De plus, plusieurs défauts localisés peuvent produire un défaut non localisé, ou un défaut localisé mais à des fréquences différentes des fréquences caractéristiques.

Les résultats expérimentaux de Stack, Habetler et Harley [59] suggèrent que les défauts non localisés produisent des changements imprévisibles dans le spectre de vibrations et de courant statorique de la machine. L'inspection microscopique a relevé des piqures et des rugosités sur toutes les surfaces de roulement, ce qui confirme la présence des défauts non localisés.

D'autres résultats expérimentaux comme ceux de A.A.Elfekey [60] montrent comment les défauts non localisés produisent des bandes latérales autour de la fréquence fondamentale et de la troisième harmonique du courant statorique ainsi qu'une augmentation d'amplitude du troisième harmonique.

Afin de fournir un diagnostic fiable, les indicateurs conçus dans le cadre de nos travaux devront donc être robustes par rapport au type de défaut (localisé ou non) mais également par rapport à toutes les autres conditions de fonctionnement (vitesse, température...).

1.12 Défauts de roulements et analyse par mesure de température

1.12.1 Etat de l'art de la détection par mesure de température

La température du roulement est un facteur important donnant une indication sur l'état de santé du roulement. Les facteurs qui influent sur la température du roulement sont [36] :

- La température du bobinage
- La Température du lubrifiant
- Circuit thermique de la machine (Chemin de refroidissement)
- Viscosité de la graisse
- Type de lubrifiant
- La quantité de graisse dans le roulement
- Jeu interne radial
- Conditions ambiantes, notamment la contamination
- Charge et vitesse
- Type et taille du roulement

Quand la température augmente, la viscosité de lubrifiant diminue à l'intérieur du roulement, et provoque la défaillance du roulement. Par conséquent, la mesure de la température de roulements donne des informations précieuses sur la santé des roulements [61].

La graisse est composée d'une huile lubrifiante et d'un savon liant [38]. Lorsque la température de fonctionnement augmente, le savon se solidifie, la graisse perd ses propriétés lubrifiantes et la rotation de la cage est perturbée. Les billes glissant alors dans les chemins de roulement provoquant une usure rapide et prononcée [26].

La mesure de température peut être aussi utilisée comme une information supplémentaire pour la détection des défauts de roulements. Par exemple, Ballal et all [62] ont utilisés des indicateurs de vibration, vitesse, courant statorique, température de l'enroulement et température du roulement pour la détection de défaut de machines asynchrones. L'étude montre que l'ajout des capteurs de température améliore la détection jusqu'à 96% de performance de détection.

1.12.2 Détection des ruptures de roulements à billes SAFRAN-Technofan par mesure de température

Les solutions proposées par SAFRAN-Technofan pour la détection de défauts de roulements sont basés sur le calcul d'indicateurs issus de mesures de températures et de vibrations. Nous montrons dans la suite la méthode de calcul de ces indicateurs, et nous montrons un exemple des extraits de résultats que peut apporter chaque indicateur.

La première détection est basée sur la mesure des températures sur les bagues extérieures des roulements. Pour cela, deux sondes de température sont intégrées au niveau des logements de roulements comme le montre la figure 1-21.

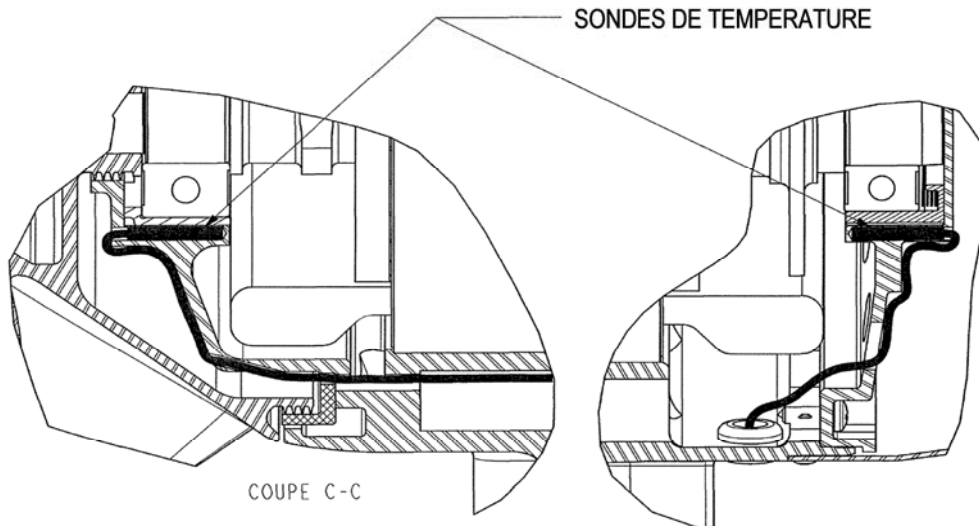


Figure 1-21 : emplacement des sondes de température dans le roulement [Technofan]

Pour chaque roulement, la température du logement est comparée à la température de référence. L'élévation notable de la température commence seulement quelques dizaines de minutes avant la rupture. Cette méthode est réservée à des ventilateurs ayant une vitesse de rotation fixe. Nous montrons sur la figure 1-22 un extrait des températures sur les roulements avant et arrière pour une ancienne campagne d'essais chez SAFRAN-Technofan. Nous remarquons sur cette figure que les indicateurs de température n'offrent pas un niveau de détection important. En effet, pour le roulement avant, la température a augmenté quelques minutes seulement avant l'arrêt de la machine ce qui est inadapté à une maintenance prévisionnelle. Pour le roulement arrière, nous n'avons remarqué aucune augmentation importante de la valeur de température.

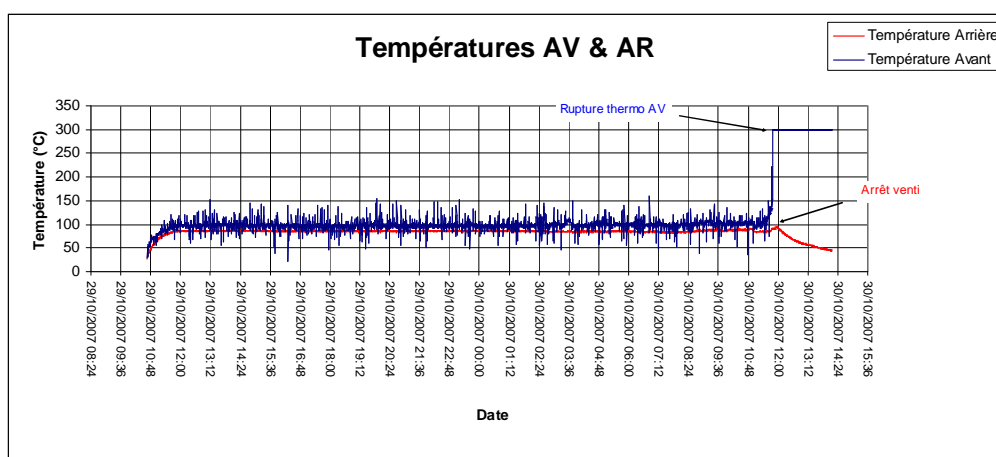


Figure 1-22 : extrait des indicateurs de température sur les roulements avant et arrière [Technofan]

1.13 Défauts de roulements et analyse vibratoire

1.13.1 Etat de l'art de la détection par analyse vibratoire

Dans le cas d'un défaut localisé sur un élément du roulement, la zone défaillante provoque un choc mécanique à chaque fois qu'il y a un contact avec cette zone et les billes, ce qui se traduit par des vibrations à une période fixe et donc provoque la présence de signaux à des fréquences particulières appelées fréquences caractéristiques de bille ou de bague (formules (1.1)).

Dans ce cas, le diagnostic de défaut par analyse vibratoire se fait par la localisation des harmoniques aux fréquences caractéristiques et aux multiples de ces fréquences. Dans le cas d'un défaut non localisé le défaut peut créer des fréquences multiples de la fréquence de rotation ou des fréquences obtenues par addition ou soustraction de différentes fréquences caractéristiques, qu'il faut également détecter. Par exemple, l'apparition d'un défaut sur une fréquence caractéristique f_1 , et d'un deuxième défaut sur une fréquence caractéristique f_2 peut créer des harmoniques de type $kf_1 \pm nf_2$.

Hochmann et Bechhoefer [11] présentent un aperçu du processus de diagnostic pour un roulement en partant du défaut mécanique, à la signature de défaut, puis au processus de détection. Le processus de détection applique la technique d'enveloppe.

Shaghghi et Kahaei [12] présentent une méthode de diagnostic de défauts de roulements basé sur la détection les impulsions du signal de vibrations causées par les défauts. Ces impulsions excitent les fréquences naturelles du roulement. L'algorithme proposé utilise la décomposition de paquet d'ondelettes (WPD) afin de localiser la sous-bande contenant les fréquences de la résonance du système.

Wilson [13] présente une méthode pour la détection de signatures caractéristiques de défauts de roulements par les données de vibrations. La méthode est basée sur un modèle probabiliste du processus de génération de signaux défaillants. La technique a été appliquée sur des défauts de bague interne, bague externe et défaut de billes.

Afin de surmonter les faiblesses de l'analyse traditionnelle d'enveloppe dans laquelle une fréquence de résonance est nécessaire, Shufeng Ai, Hui Li et Yuping Zhang [14] ont proposé une nouvelle approche basée sur la décomposition de mode empirique d'ensemble (EEMD) pour la détection des défauts localisés des roulements. Cette approche peut extraire les fréquences caractéristiques liées au défaut de la bande de fréquence de résonance du signal vibratoire. Les techniques sont validées par des expérimentations sur une machine-outil avec un roulement à billes défaillant au niveau des bagues internes et externes. Les résultats expérimentaux montrent que l'approche proposée est efficace et fiable pour la détection des défauts localisés des roulements.

Elfeky, Masoud et El-Arabawy [60] ont étudié l'effet des défauts des roulements à billes sur les vibrations et le courant statorique des machines asynchrone par analyse spectrale. Les résultats expérimentaux sont donnés pour une machine saine, puis pour une machine avec des

défauts localisés et avec des défauts non localisés pour les signaux de vibration et de courant statorique.

Changting Wang et Gao [63] ont étudié la stratégie de placement du capteur pour la détection des défauts d'un roulement à billes. Le placement des capteurs est essentiel à la réalisation de mesures de haute qualité pour le diagnostic de surveillance. Basées sur une étude analytique de la propagation du signal depuis l'emplacement des défauts vers les capteurs, les simulations numériques à l'aide d'un logiciel à éléments finis ont été menées afin d'étudier la variation du signal vibratoire par rapport au changement du placement des capteurs. Les résultats ont été également expérimentalement vérifiés par le biais de mesures réelles. L'étude a montré que pour obtenir un rapport signal sur bruit élevé, les capteurs doivent être placés aussi près que possible du roulement où sont produits les signaux provenant de défauts de construction.

Seryasat, Shoorehdeli et Honarvar [64] ont utilisé la méthode 'multi classe support vector machine' (MSVM) pour la détection et la classification des défauts de roulements. La méthode classe les informations obtenues des signaux vibratoires à l'aide de classificateur MSVM. Le point d'intérêt de cette étude est la présence d'une méthode efficace pour le diagnostic multi-défaut, au prix d'une puissance de calcul importante pour l'algorithme de classification.

Abdussalam [65] a appliqué la méthode TESPAP (Time Encoded Signal Processing and Recognition) sur les signaux vibratoires. Les résultats montrent que l'analyse TESPAP fournit une méthode améliorée de détection des défaillances de roulements lorsqu'elle est combinée avec un signal d'enveloppe.

Bo Ling [66] a présenté une méthode de détection, identification et classement des diverses étapes de défaut par analyse vibratoire. Pour détecter les étapes des roulements défectueux, une méthode d'analyse du degré d'aléatoire 'degree of randomness' (DoR) a été développée à l'aide de l'entropie de Shannon et de la théorie de matrice de covariance aléatoire. Pour classer les défauts, un ensemble de modèles stochastiques en utilisant la théorie de 'Gaussian Mixture Hidden Markov Model' (GM-HMM) a été ajouté.

Seryasat, Shoorehdeli et Honarvar [67] ont suggéré l'entropie et la RMS (Root Mean Square), comme solution pour la détection de défauts en utilisant les signaux vibratoires. Pour diagnostiquer les défauts de roulement à billes, des essais avec le roulement à billes défectueux pour différentes vitesses et différents niveaux de charges ont été menés. L'analyse provient des signaux de roulements à billes avec six différents types de défauts dans des conditions de travail différentes. Les résultats ont montré que l'approche de diagnostic basée sur l'utilisation d'ondelettes et de FFT pour extraire l'énergie de l'entropie et la RMS permet d'identifier des défauts de roulements à billes.

He et al. [68] ont présenté le développement et l'évaluation d'indicateurs de condition (CIs) pour la détection de défauts des roulements en céramique, en utilisant des capteurs d'émission acoustique (AE). Cette méthode est développée en utilisant une décomposition de mode empirique (EMD). La méthode est évaluée et testée avec un roulement défaillant au niveau des billes, des bagues interne et externe et de la cage.

Seryasat, Shoorehdeli et Honarvar [69] ont utilisé la méthode EMD comme un prétraitement pour décomposer le signal de vibration non-stationnaire d'un roulement à un certain nombre de fonctions de mode intrinsèque (le FMI) (composantes stationnaires). Certains IMFs spéciaux ont été choisis pour obtenir la transformation d'Hilbert puis le spectre marginal d'Hilbert. Les défauts dans le roulement peuvent être finalement diagnostiqués et identifiés sur le dernier spectre marginal d'Hilbert.

Lim et al. [70] ont détaillé l'utilisation de fréquence de résonance structurelle, ISO 10816 pour l'évaluation de niveau de vibrations et l'évaluation de spectre pour la détection des défauts de roulements. De plus, la réparation a été incluse pour recommander différents plans de maintenance selon les conditions de défaut. Ces méthodes forment la base d'un système de diagnostic.

Patel, Gupta et Kumar [71] ont évalué l'efficacité des techniques pour la détection de défauts en temps réel dans des moteurs asynchrones. Les techniques évaluées sont : RMS, facteur de crête, Skewness (moment d'ordre 3), Kurtosis, variance, déviation standard, fonction de distribution de probabilité et analyse fréquentielle. Les modes de défaillance du rotor et les fréquences caractéristiques associées à la construction physique des roulements sont examinés. Les résultats expérimentaux de spectres de vibrations avec de différents types de défaut sont inclus, pour un moteur asynchrone de 7,5 kW. Les résultats montrent l'efficacité de la méthode proposée pour plusieurs roulements à billes avec application de plusieurs types de défauts (corrosion, défaut de billes, défauts de bagues interne et externe).

Zoubek, Villwock et Pacas [54] ont étudié la détection de défauts de roulements à billes pour les deux types défauts : localisé et non localisé. En se basant sur le calcul des bandes de tolérance autour de certaines fréquences calculées, un algorithme automatique de détection de défauts est présenté pour les deux types de défauts.

Nous remarquons que la plupart des études récentes classent les défauts en localisés/non localisés. Vu la possibilité de production de l'un ou l'autre type, il est toutefois intéressant de construire un indicateur capable de détecter les deux types de défaut.

Nous remarquons aussi la large palette des outils mathématiques utilisés pour la détection de défauts. Ces outils sont parfois compliqués, et le temps de calcul, donc aussi de la phase de diagnostic, devient plus important. Il est intéressant de chercher un indicateur optimal, qui est le plus simple niveau algorithmique, mais qui assure la bonne détection de défaut.

La plupart des études dans la littérature traite des machines asynchrones à forte puissance et faible vitesse, connectées réseau. Certaines études traitent une combinaison d'indicateur vibratoire et d'indicateur de courant, mais la plupart ne considère que les indicateurs vibratoires vu leur facilité et capacité de détection. Comparé à notre application, nous sommes à la recherche d'un indicateur simple, qui traite des grandeurs autres que les signaux vibratoires, pour des machines synchrone à puissance moyenne et à haute vitesse, connecté MLI, tout en s'intéressant à la détection des deux classes de défauts localisés/non localisés.

1.13.2 Détection des ruptures de roulements à billes TECHNOFAN par mesure vibratoire

La détection est basée sur la mesure vibratoire au niveau de chaque roulement. Les accéléromètres sont placés dans le ventilateur comme le montre la figure 1-23.

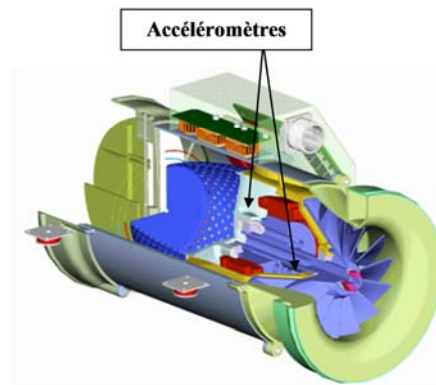


Figure 1-23 : emplacement des capteurs vibratoires dans le roulement [Technofan]

La méthode consiste à mesurer le niveau global d'accélération en g par la méthode RMS (Root Mean Square), entre les bandes fréquentielles de 1 à 19 kHz (ou de 1 à 10 kHz) et à le comparer à un niveau d'alarme, puis d'arrêt du ventilateur.

Nous montrons sur la figure 1-24 l'extrait des indicateurs vibratoires calculés sur les roulements avant et arrière. Nous avons observé une dégradation franche du niveau vibratoire une dizaine d'heure seulement avant la rupture des roulements. Nous remarquons aussi que le niveau de l'indicateur vibratoire avant (du côté du roulement défaillant) est plus important que celui de l'indicateur vibratoire arrière puisque le roulement dégradé est le roulement avant.

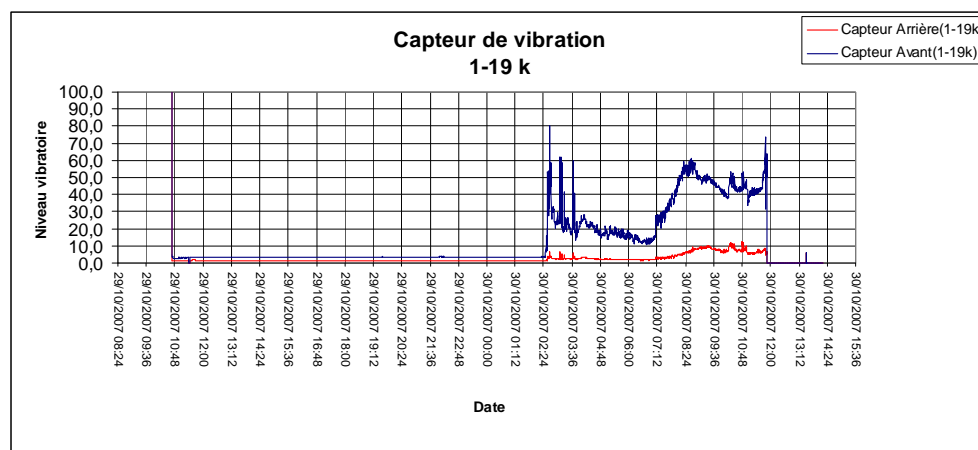


Figure 1-24 : extrait des indicateurs vibratoires calculé entre 1 et 19 kHz sur les roulements avant et arrière [Technofan]

Les indicateurs vibratoires semblent plus efficaces que les indicateurs de température, mais leur implantation dans le système et leur coût élevé favorise la recherche d'autres types d'indicateurs, basés sur des grandeurs électriques, ce qui sera le sujet de cette thèse.

1.14 Influence des défauts de roulements sur les courants statoriques

1.14.1 Présentation générale

Les vibrations créées par les défauts peuvent se traduire dans le courant statorique par des modulations des fréquences de défaut autour de la fréquence électrique fondamentale. Plusieurs études s'intéressent à l'identification des causes de défauts des roulements, afin de pouvoir détecter ces défauts.

Bonnett [36], [72] a utilisé une méthode pour identifier la cause de défaut pour les roulements d'antifriction utilisés dans les moteurs électriques. Il a fourni une méthode d'analyse des actions correctives exigées pour minimiser ou prévenir la récurrence du problème.

Eren, Karahoca et Devaney [73] ont utilisés la décomposition en ondelettes et les réseaux de neurones pour détecter les défauts de roulements sur les signaux de courant statorique. Suivant leur étude, l'utilisation des réseaux de neurones améliore la précision de la détection vers 80% des cas testés.

Tse et Dong Wang [74] ont présenté une méthode de détection de défaut appelée SPARSOGRAM. Le concept principal de SPARSOGRAM est tiré de la mesure SPARSITY communément utilisée pour analyser des signaux ultrasoniques. SPARSOGRAM est capable de découvrir des bandes de fréquences résonnantes qui augmentent en présence de défaut de roulements. Pour vérifier l'efficacité de SPARSOGRAM, trois différents types de signaux simulés et un signal réel recueilli sur la machine industrielle défaillante ont été évalués. Les résultats montrent que le SPARSOGRAM a de bonnes capacités pour établir l'état de santé du roulement déterminer les causes de défaut.

H. Henao, H. Razik, et G.-A. Capolino [75] ont étudiés le contenu spectral du courant statorique théorique et expérimental d'une machine asynchrone en cas sain et en présence de défaut de barres cassées. Nous allons dans le chapitre 2 présenté une étude qui ressemble à cette étude mais pour le cas d'une machine asynchrone connectée MLI.

Une étude expérimentale de l'effet de la défaillance sur les courants statoriques ainsi sur d'autres signaux sera présentée en chapitre 2 pour notre application. Nous allons étudier dans la suite les phénomènes qui peuvent être à l'origine de l'apparition des modulations dans les courants statoriques : l'excentricité et l'oscillation de couple.

1.14.2 Excentricité

La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries qui sont naturelles [76], la machine électrique peut dans ce cas être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique). Son origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulements (usure), à un défaut de charge ou à un défaut de fabrication.

La figure 1-25 [77] montre les trois cas d'excentricités généralement distingués :

- L'excentricité statique : le rotor est déplacé du centre de l'alésage mais tourne toujours autour de son axe. Les raisons de ce phénomène peuvent être les tolérances de fabrication, un noyau ovale du stator, un positionnement incorrect des billes ou une usure du roulement [77],
- L'excentricité dynamique : le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe. Ce phénomène peut résulter encore d'une tolérance de fabrication, d'une usure du roulement, mais encore d'un arbre courbé ou flexible. Il est possible encore que les niveaux d'excentricité statique élevés provoquent une excentricité dynamique [77][78],
- L'excentricité mixte : associant les deux cas, statique et dynamique [79][80].

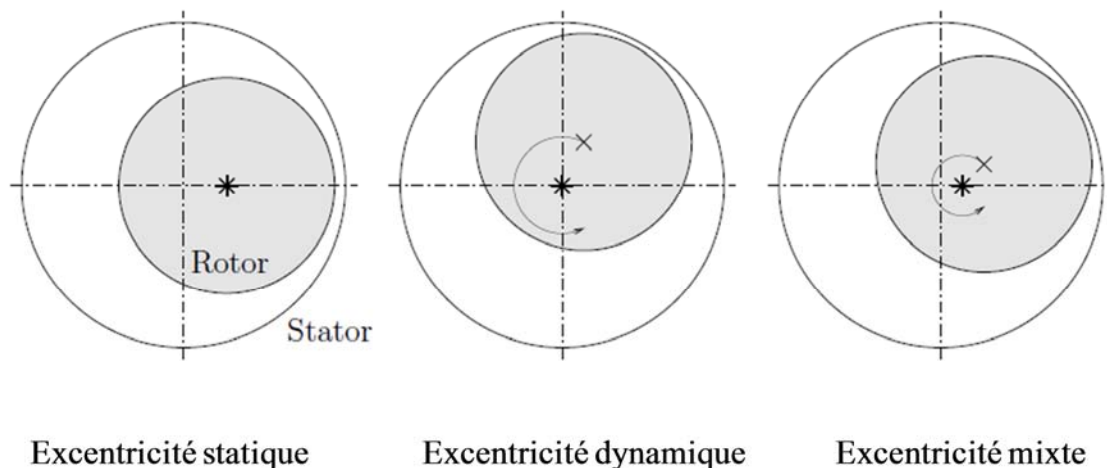


Figure 1-25 : différentes types d'excentricité : statique, dynamique et mixte [77]

Knight et Bertani [81] ont développés une technique d'essai pour créer les défauts d'excentricité et les défauts de roulements. Cette technique d'essai permet d'enquêter la capacité de détection des défauts de roulements en utilisant le courant statorique. Les résultats expérimentaux d'essai sont présentés, en indiquant la possibilité à priori de découvrir la dégradation du roulement en utilisant cet équipement.

1.14.3 Oscillation du couple mécanique

Certaines classes de défauts mécaniques, par exemple, défauts de transmission, défauts de désalignement, déséquilibre de la charge ou les défauts de roulements, peuvent générer des variations périodiques dans le couple de charge, et donc, des oscillations de vitesse [77]. Le défaut créé par une oscillation du couple mécanique modifie le comportement magnétique et mécanique de la machine. Lorsqu'un défaut se situe au niveau d'un contact bille-bague, celui-ci entraîne une résistance dans le mouvement de la bille ou de la bague qui se traduit alors par une variation du couple résistant développé au sein du roulement [26]. Dans le cas de défauts localisés, des harmoniques apparaissent sur le couple de l'arbre de la machine [82].

Eren, Karahoca et Devaney [73] montrent que les défauts de roulements induisent des vibrations résultant de la modulation du courant statorique. Le courant statorique peut être

analysé par décomposition d'ondelettes pour détecter les défauts des roulements. Dans cette étude, les réseaux de neurones sont utilisés pour améliorer la détection de défauts.

La méthode d'analyse des signatures du courant (MCSA) est une technique de détection des défauts par analyse du courant statorique qui utilise des techniques mathématiques comme la FFT. Lau et Ngan [83] ont évalué l'utilisation de MCSA pour la détection des défauts de bague extérieure des roulements. La vérification expérimentale montre que la méthode pour MCSA est efficace pour la détection des défauts de roulements avec utilisation de transformation par paquet d'ondelettes (WPT).

Neti et al. [84] ont décrit une méthode d'analyse du vieillissement thermomécanique accéléré du moteur. La surveillance par analyse online du vieillissement accéléré s'est montrée comme une méthode de détection des défauts des machines électriques efficace et identique à l'étude du vieillissement temps réel. Cette méthode a été appliquée, avec la technique MCSA sur une machine asynchrone 3 phases, 3 paires de pôles et 2300 volts pour l'identification des fréquences caractéristiques correspondant à certains défauts comme les défauts des barres cassées, l'excentricité statique et dynamique.

Tsoumas et al. [85] ont fourni une comparaison complète de techniques d'analyse par MCSA pour les défauts de roulements : barres de rotor cassées et excentricité. Quatre catégories caractéristiques de traitement de la MCSA sont étudiées : l'analyse de Fourier des courants de phase, les méthodes paramétriques 'eigenanalysis' pour l'estimation de spectre des courants de phase, l'analyse en ondelette et l'analyse vectorielle spatiale. Dans cette étude, chaque technique d'analyse avec ses avantages et inconvénients est présentée et discutée.

Blodt [86][87] a étudié l'effet d'un défaut de roulements sur une machine asynchrone pour détecter le défaut en utilisant l'analyse du courant statorique. La présence d'un défaut de roulements cause un mouvement radial de rotor particulier, des variations du couple mécanique en sont la conséquence.

Benbouzid et al. [88] ont utilisés une technique avancée de MCSA qui est l'analyse spectrale en haute résolution pour la détection et la localisation de défauts électriques et mécaniques des machines asynchrones. L'utilisation de spectre à haute résolution est choisie puisque l'analyse faible résolution n'était pas suffisante pour détecter des changements dans le spectre de courant statorique en présence de défaut.

Finalement, Zhou, Habetler et Harley [53] ont rédigé une étude complète des différentes techniques de détection de défaut par l'utilisation du courant statorique.

Il est à noter que la plupart de ces études traitent des machines asynchrones à forte puissance, connectées réseau, et utilisent uniquement le courant statorique. La plupart des auteurs ont traités plusieurs outils mathématiques pour la détection de défaut de roulements, mais ces outils sont appliqués à un seul type de machine et dans la plupart des cas pour un seul point de fonctionnement (vitesse fixé). Nous traitons dans notre étude les machines synchrones à aimants permanents connectées MLI, et nous allons utiliser différents signaux pour la détection de défaut et pour différentes vitesses de fonctionnement.

1.15 Outils mathématiques utilisées pour la détection de défauts de roulements

1.15.1 Généralités

Les défauts de roulements couvrent un axe important de recherche dans les dernières années. Plusieurs techniques de détection de défauts des roulements ont été proposées récemment, la plupart étudie les signatures de défauts dans les signaux vibratoires, certaines étudient les signatures de défauts dans les signaux courants, comme le courant statorique. La base de ces techniques utilisées pour la détection de défaut repose sur des algorithmes qui utilisent des outils mathématiques comme la transformée de Fourier, l'analyse temps fréquence ou le Kurtosis spectral. Nous allons dans ce paragraphe définir chacun de ces outils mathématiques, en montrant quelques exemples de leur utilisation pour la détection de défauts de roulements.

1.15.2 Analyse fréquentielle, transformée de Fourier

La transformée de Fourier, ou plus généralement l'analyse fréquentielle ou spectrale, est un outil fondamental pour la compréhension et la mise en œuvre de nombreuses techniques numériques de traitement des signaux et des images. On appelle transformée de Fourier (TF) d'un signal $x(t)$ quelconque la fonction $\hat{x}(f)$ (dite aussi spectre de $x(t)$) définie par :

$$\hat{x}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1-2)$$

La transformée de Fourier est l'une des techniques les plus simples et les plus utilisées pour la détection de défauts de roulements. En effet, nous avons montré que la présence de défauts de roulements affecte certaines fréquences caractéristiques. Il est donc normal de penser que l'augmentation d'énergie de ces harmoniques puisse être détectée par analyse fréquentielle.

Plusieurs études ont utilisé la FFT pour la détection de défauts de roulements comme [79], [80], mais aucune de ces études n'utilise les signaux de vitesse et de position pour la détection de défaut. Généralement, les signaux étudiés sont les signaux de vibration et de courant statorique, et la plupart des applications sont des machines asynchrones. Cette technique est aussi utilisée pour la construction d'autres techniques comme nous allons voir dans la suite.

1.15.3 Analyse temps-fréquence

Les représentations d'un signal dans le plan temps-fréquence donnent une description intuitive des signaux non-stationnaires dont le contenu fréquentiel varie au cours du temps et comportant des régimes transitoires.

Nous pouvons classer les méthodes d'analyse temps-fréquence en deux catégories : linéaire et quadratiques.

- Représentations linéaires : transformée de Fourier à court terme, décomposition de Gabor, transformées en ondelettes,
- Représentations quadratiques : Spectrogramme, fonction d'ambiguïté, distribution de Wigner-Ville.

Transformée de Fourier à court terme

La transformation de Fourier à court terme (**T.FCT**) réalise une analyse harmonique « locale » du signal à traiter : c'est une représentation fréquentielle du signal via une fenêtre d'analyse. Elle considère implicitement que l'évolution du signal est peu conséquente sur l'étendue de la fenêtre qui n'est généralement significativement différente de zéro que sur un intervalle borné. Les fenêtres d'analyse les plus usuelles sont rectangulaires, triangulaires ou de formes plus élaborées permettant d'atténuer l'amplitude des lobes secondaires dans le domaine de Fourier (Kaiser-Bessel, Hamming...). Cette transformation habituellement présentée dans le domaine temporel s'exprime également dans le domaine fréquentiel.

La transformée de Fourier à court terme permet de réintroduire une dimension temporelle à la transformée de Fourier, en effectuant une succession d'analyses locales du signal observé à travers une fenêtre. On représente la distribution de l'énergie du signal dans le plan temps-fréquence via le carré du module de la transformée de Fourier à court terme (TFCT). Cette représentation est appelée spectrogramme.

Spectrogramme

Le spectrogramme est le module carré de la transformation de Fourier à court terme le spectrogramme implique une hypothèse de stationnarité locale du signal étudié. Il peut être évalué dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel (étant appelé, dans ce dernier cas, sonogramme).

1.15.4 Kurtosis spectral

La notion de Kurtosis spectral est introduite pour la première fois par Dwyer [89] comme le Kurtosis dans le domaine fréquentiel pour détecter et caractériser les événements transitoires dans un signal. Antoni et Randall [90], [91] ont proposé une définition et une formalisation compréhensible du Kurtosis spectral pour les processus non stationnaires. L'étude présente plusieurs exemples d'application du Kurtosis spectral pour la détection et le diagnostic des défauts. A partir de cette définition, plusieurs auteurs ont utilisé le Kurtosis spectral pour la détection des défauts, ces derniers étant considérés comme des réalisations non-stationnaires.

En 2005, Sawalhi et Randall [92] ont travaillé sur l'optimisation de l'algorithme de Kurtosis spectral en utilisant l'ondelette de MORLET complexe.

McInerny et Dai [93] ont présenté une étude des caractéristiques fondamentales de fonctionnement des roulements et les formules pour le calcul des fréquences caractéristiques

sont fournies. L'analyse d'enveloppe et la relation entre les signatures des défauts de roulements et l'apparition des modulations sont expliquées en utilisant un signal de vibration synthétique qui partage plusieurs caractéristiques importantes de signatures de vibrations mesurées.

Bechhoefer, Menon et Kingsley [94] ont comparé les performances du Kurtosis spectral (SK) et de l'enveloppe Kurtosis (EK) en utilisant un ensemble de données pour un défaut connu. Le but de cette comparaison est de sélectionner une fréquence optimale et une fenêtre de bande de fréquences pour l'analyse d'enveloppe. Une mesure d'efficacité (MOE) a été établie pour évaluer la capacité de SK/EK pour prédire la fenêtre d'analyse d'enveloppe optimale.

Yuan Yunlong et Zhang Zhenxiang [95] ont présenté une technique d'analyse spectrale temps-fréquence, combinée avec la méthode Kurtosis et l'analyse d'ondelettes, pour la détection et le diagnostic des fautes basées sur les signaux de vibration des roulements. Avec cette méthode, les signaux ont été décomposés et reconstruits par l'analyse d'ondelette, suivie par l'analyse de démodulation et le raffinement spectral en utilisant la transformation de Hilbert. Les résultats d'expérience montrent que les informations de défaut des roulements peuvent être détectés et diagnostiqués efficacement.

Le Kurtosis spectral est de plus en plus utilisé pour la détection de défaut des machines électriques, en raison de la simplicité de l'algorithme, et de sa capacité à détecter des événements non stationnaires (expliqués dans chapitre 4).

Cependant, les applications présentées dans la littérature sont, encore une fois, appliquées sur les machines asynchrones connectées réseau.

1.15.5 Kurtogram

Le Kurtogram est défini pour la première fois par Antoni et Randall [91] pour généraliser le Kurtosis spectral pour la détection des composantes non stationnaires sans connaissance des paramètres du signal (Blind Detection).

Antoni [96] a optimisé le calcul du Kurtogram, le niveau de complexité de l'algorithme devient alors similaire au calcul d'un simple FFT ($N \log N$). L'efficacité de l'algorithme est illustrée pour différentes applications industrielles (détection d'organe distrait dans les canalisations des centrales nucléaires, diagnostic de défaut de roulements par analyse vibratoire pour la boîte de vitesse d'un hélicoptère).

Une guide d'analyse et de diagnostic de roulements est proposé par [97], en particulier en présence de forts signaux masquant d'autres composantes du signal. L'étude est illustrée par l'application à un certain nombre de machines, depuis la très faible vitesse jusqu'aux machines de très grande vitesse. Les caractéristiques spécifiques des signaux des roulements sont expliquées avec détails, en particulier dans le fait qu'ils ne sont pas périodiques, mais stochastiques, un fait qui leur permet d'être séparés des signaux déterministes. Ils peuvent être modélisés comme cyclo-stationnaires pour quelques buts, mais ne sont en fait pas sévèrement cyclo-stationnaires (au moins pour les défauts localisés). Le terme pseudo-cyclo-stationnaire leur a donc été attribué. Ce guide montre l'efficacité de l'utilisation du Kurtosis spectral pour

les défauts localisés et l'efficacité de l'utilisation de (MED) (Minimum Entropy Deconvolution) pour enlever les événements d'origine inconnue pour les machines à très grande vitesse. Ces techniques sont utilisées pour séparer les composantes stationnaires des composantes cyclo-stationnaires et finalement le diagnostic est fait par l'intermédiaire de 'l'analyse d'enveloppe'.

Zhang et Randall [98] présentent un modèle et un algorithme pour concevoir les paramètres de l'analyse d'enveloppe par l'utilisation de la combinaison du Kurtogram pour les estimations initiales et d'un algorithme génétique pour l'optimisation finale. La faisabilité et l'efficacité de la méthode proposée sont démontrées par l'expérience et donnent de meilleurs résultats que la méthode classique. La méthode permet plus de flexibilité dans le choix des paramètres optimaux que le Kurtogram.

Bellini et Cocconcelli ont utilisé le Kurtogram introduit par Antoni pour le diagnostic des défauts mécaniques [99] et pour la détection des défauts aléatoires sur des signaux de vibrations et de courants [100]. Ce travail a montré que le Kurtosis spectral est très sensible aux harmoniques de MLI et à la vitesse de rotation de la machine.

Lei et al. [101] proposent une méthode améliorée du Kurtogram en adoptant la transformée en paquet d'ondelettes (WPT) comme le filtre de Kurtogram au lieu de l'utilisation de la transformée de Fourier à court terme (STFT) ou de filtres (FIR). Les signaux de vibrations recueillis à partir des roulements sont utilisés pour démontrer la performance améliorée de la méthode proposée par rapport à l'original Kurtogram. Les résultats valident l'efficacité de la méthode pour l'extraction des caractéristiques de défauts et le diagnostic des défauts de roulements.

L'avantage du Kurtogram est la possibilité d'identification des fréquences caractéristiques de défauts. Cet avantage ne nous sera pas utile puisque les fréquences caractéristiques de notre application sont calculées à partir des paramètres du roulement comme nous l'exposerons au paragraphe 1.11.1.

Le Kurtogram est utilisé aussi pour calculer des estimations du filtre de Wiener et des filtres adaptés [96]. Ces techniques seront importantes pour une détection du défaut sans connaissance du contenu spectral des signaux (détection à l'aveugle).

1.16 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés un résumé de différentes revues étudiant la surveillance de l'état de santé de roulements. Nous remarquons que généralement, ces études sont contradictoires, et il est difficile d'obtenir des résultats définitifs. L'un des points communs de ces études est l'importance de surveillance des défauts de roulements comme étant les plus prépondérants dans les machines électriques.

Nous avons montré les différents types de défauts de roulements ainsi que les différentes solutions de diagnostic proposées par les auteurs, se basant sur différentes techniques mathématiques et appliquées sur les signaux vibratoires ou encore sur les courants statoriques. Nous remarquons que la plupart des études traitent de défaut de roulements utilisés dans les machines asynchrones connectés réseau, à forte puissance.

La détection de défauts nécessite des connaissances préalables sur les équipements à surveiller, c'est pourquoi, la plupart des études sont limitées à certaines applications.

L'un des objectifs de notre étude est de remplacer les indicateurs vibratoires déjà présents dans un drive, par des indicateurs basés sur des mesures de courants, moins coûteux et plus faciles à implanter dans le système.

Nous avons présentés les indicateurs de vibrations et de température utilisés chez SAFRAN-Technofan. L'indicateur vibratoire y semble le plus pertinent. Cet indicateur sera utilisé comme référence de comparaison avec les indicateurs que nous mettrons en place dans la suite de cette étude.

En se limitant à notre application, le système étudié sera un ventilateur de type LP2 de l'entreprise SAFRAN-Technofan, entraîné par une machine synchrone à aimants permanents, commandé en MLI. L'équipement sera détaillé dans le chapitre 2.

Malgré que nous traitons un cas particulier dans notre étude (un ventilateur TECHNOFAN), nous nous intéressons à construire des indicateurs généralisés capables à détecter plusieurs types de défauts, et pour plusieurs vitesses de fonctionnement. Nous allons donc présenter une étude générale du contenu spectral des signaux étudiés, et la propagation d'un défaut dans le spectre de ces signaux.

Chapitre 2 : Capitalisation de connaissances sur l'équipement en régime sain

2.1 Introduction

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre précédent, la mise au point d'algorithmes de détection nécessite des connaissances préalables sur les équipements à surveiller. Les informations qui en sont extraites ont des natures diverses (électriques, mécaniques, thermiques, magnétiques,...) et peuvent être sensibles à de nombreux effets affectant le comportement de l'objet. Le changement des conditions de fonctionnement ou d'environnement influent par exemple sur les caractéristiques de ces informations parmi lesquelles, celles liées à l'évolution de l'état intrinsèque de l'objet nous intéressent tout particulièrement dans le contexte de la surveillance. L'objectif est de pouvoir déterminer si l'objet étudié est en train d'évoluer par rapport à un état de référence, que nous nommerons état « sain », vers un état « dégradé » ou « défaillant » et quelle est la dynamique de cette évolution. Le rôle des techniques de surveillance et de détection sera donc d'extraire de ces informations caractéristiques qui sont sensibles à l'évolution de son état de santé, tout en garantissant une indépendance vis-à-vis des changements relatifs aux conditions de fonctionnement extérieures et aux points de fonctionnement.

Les informations dont nous disposons se présentent sous la forme de signaux prélevés sur l'objet par des capteurs, ce chapitre traite donc du contenu théorique des signaux de l'équipement pour lequel nous avons choisi l'espace fréquentiel comme espace d'observation. Cette étude doit nous permettre de faire état des connaissances *a priori* que nous sommes capables de faire émerger par rapport aux caractéristiques des signaux prélevés. L'objectif est d'identifier les harmoniques présents dans les signaux en régime de fonctionnement sain pour mieux pouvoir discriminer les signatures accompagnant l'apparition d'un défaut. Rappelons que cette étape de capitalisation n'est pas propre à l'équipement support à cette étude. Elle fait partie intégrante de la démarche conduisant à la mise en place d'un dispositif de surveillance, il faut en effet dans un premier temps mieux connaître pour mieux détecter ensuite.

Dans une première partie de ce chapitre, une étude théorique est donc menée pour identifier le contenu spectral théorique des différents signaux prélevés. Cette étude est complétée par des simulations numériques de certains signaux afin de valider l'approche de modélisation réalisée.

L'évolution du contenu spectral de ces signaux est ensuite traitée en présence d'imperfections de construction inhérente à tout équipement. Il s'agit pour notre cas d'imperfections liées à des décalages géométriques des capteurs de position ou d'aimants situés sur la roue polaire. A ce titre, nous contribuons à créer du lien entre les objets du génie électrique et les méthodes du traitement du signal, puisque nous tenons compte dans notre stratégie de diagnostic, des caractéristiques spécifiques de la machine énoncées ci-avant.

L'identification des harmoniques pouvant apparaître sur les signaux étudiés est ensuite poursuivie avec la prise en compte d'harmoniques sur la vitesse de rotation. Nous expliquerons dans quelle mesure ce phénomène, naturellement présent en régime sain, fait apparaître une richesse harmonique supplémentaire sur l'ensemble des grandeurs observées. Finalement une étude des signaux expérimentaux prélevés en régime sain lors de deux

campagnes d'essais a été menée chez notre partenaire industriel (SAFRAN Technofan) pour valider la présence des harmoniques théoriquement identifiés. Il est à noter que cette conduite de deux campagnes d'essais, forcément consommatrice de temps, nous permettra de mettre en évidence une certaine robustesse des algorithmes proposés et qu'elles incluent les phases de rodage des roulements neufs.

2.2 Présentation de l'équipement et des signaux observés



Figure 2-1 : Ventilateur TECHNOFAN de type LP2- 5kVA – Vitesse max = 14100 tr/min - (origine TECHNOFAN)

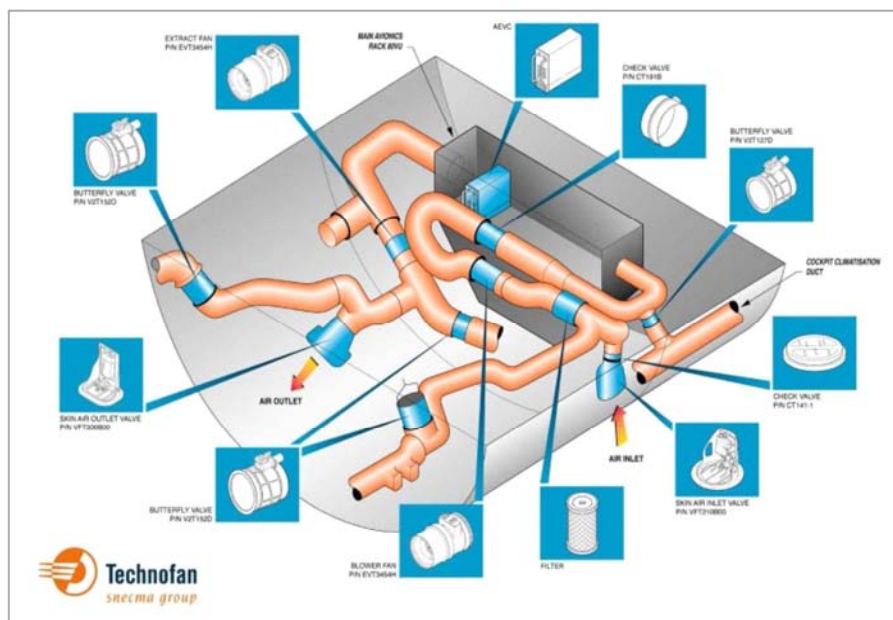


Figure 2-2 : Système de conditionnement d'air A380 - (origine TECHNOFAN)

Le système étudié est un ventilateur de conditionnement d'air assurant la ventilation et le renouvellement de l'air cabine pour les avions civils. L'équipement utilisé est un ventilateur de type LP2 d'une puissance de 5 kVA. Sa vitesse de fonctionnement maximale est d'environ 14000 tr/min, il est présent en 11 exemplaires sur les A380 pour la circulation d'air en cabine.

La figure 2-2 montre le système de conditionnement d'air cabine de l'avion A380.

L'ensemble convertisseur-moteur-ventilateur est intégré dans un même ensemble mécanique. Une coupe de cet ensemble intégré est donnée sur la figure 2-3.

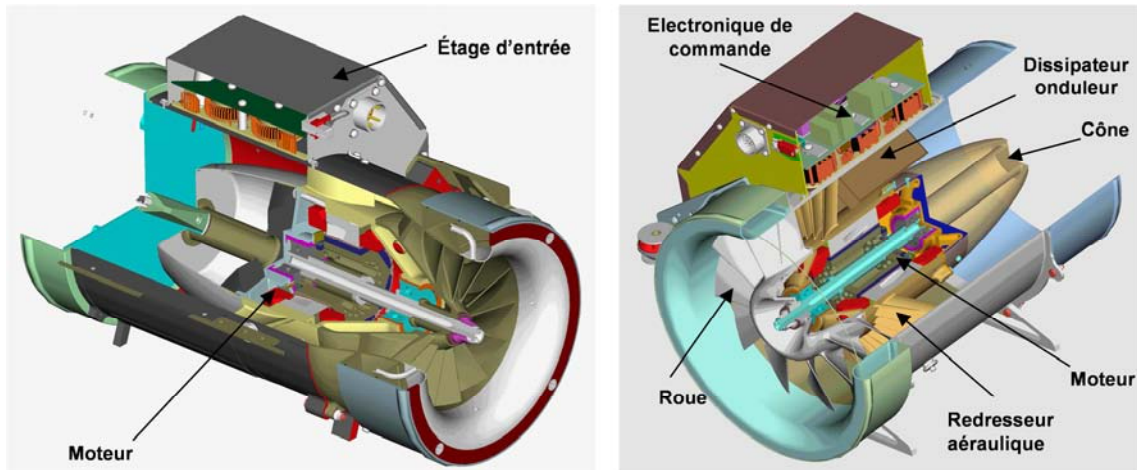


Figure 2-3 : Coupe d'un équipement complet - (origine TECHNOFAN)

La figure 2-4 présente une coupe de l'ensemble moteur – ventilateur, où apparaissent le stator et le rotor de la machine ainsi que les roulements avant et arrière. La roue polaire, solidaire du rotor, permet, en passant devant les capteurs de position à effet Hall, de donner la position du rotor servant à l'électronique de pilotage.

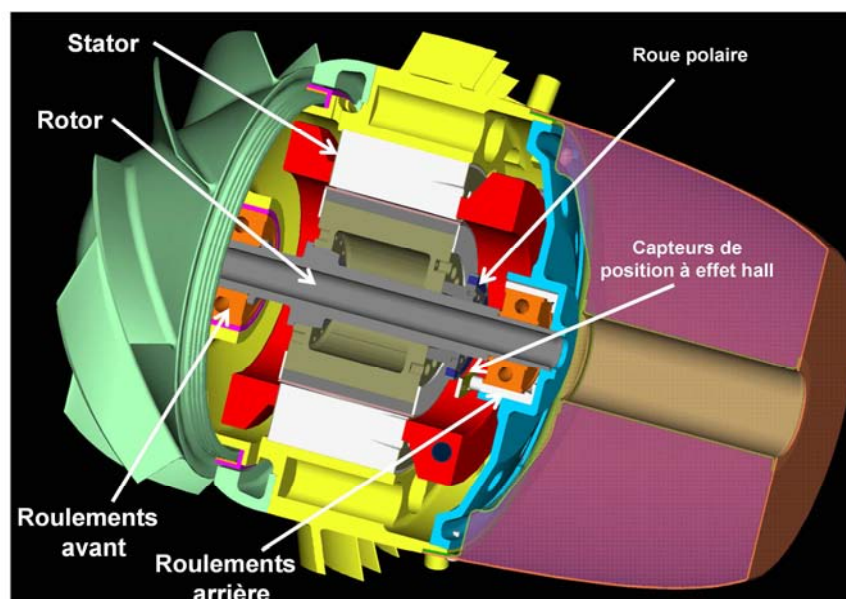


Figure 2-4 : Vue de coupe d'un ensemble moteur avec la roue du ventilateur - (origine TECHNOFAN)

Cette machine est alimentée à partir d'un onduleur à modulation de largeur d'impulsions (MLI) permettant d'alimenter les phases de la machine par une onde de courant carrée de 120° . La figure 2-5 décrit l'architecture du système complet.

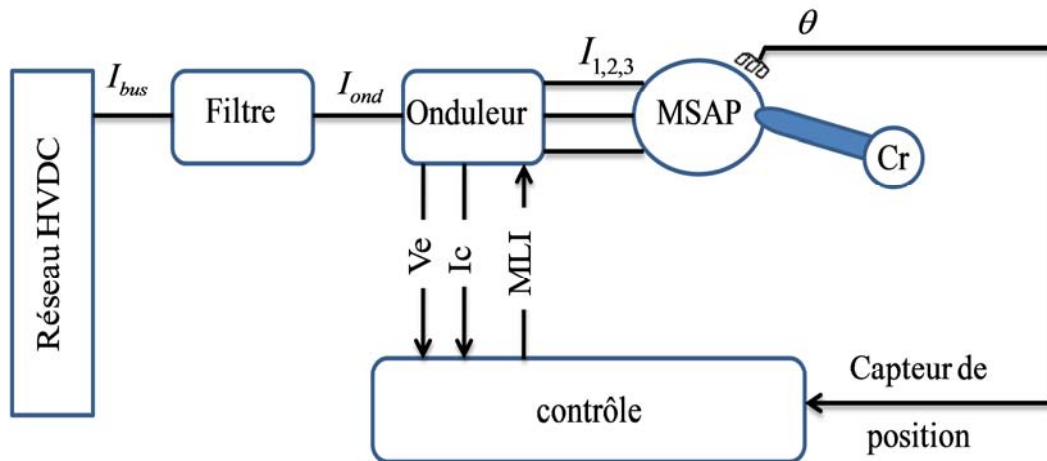


Figure 2-5 : Architecture du système

Le système est régulé en courant et en vitesse par deux PI en cascade. Les trois capteurs de position à effet Hall permettent de synchroniser les séquences de pilotage de la MLI afin d'imposer le courant dans les phases de la machine. Ils servent également à approximer la vitesse de rotation de l'actionneur puisque ce dernier ne présente aucun capteur de vitesse.

Pour notre étude, l'équipement est muni de capteurs qui permettent de mesurer différentes grandeurs caractéristiques. L'enregistrement de ces différentes grandeurs est assuré par l'intermédiaire d'une carte de mise en forme associée à une carte d'acquisition. Une description détaillée du banc d'essai et de son instrumentation est détaillé en Annexe A . Les signaux disponibles sont :

- Courants de phase : $I_{1,2,3}$
- Courant de bus : I_{bus}
- Courant étage d'entrée de l'onduleur : I_{ond}
- Courant capacité de filtrage : I_{capa}
- Capteurs de position : C_1 , C_2 et C_3

Nous allons plus principalement, dans la suite de ce chapitre, nous focaliser sur le contenu fréquentiel des signaux C_1 , C_2 , C_3 , $I_{1,2,3}$ et I_{ond} . Nous reviendrons ultérieurement sur l'étude de I_{bus} et I_{capa} dans le chapitre suivant.

2.3 Contenu fréquentiel des signaux issus du capteur de position en régime sain

Les ordres de commande de l'onduleur assurant l'alimentation de la machine sont générés à partir des capteurs de position. Ces derniers, décalés entre eux de 40° (figure 2-6), sont en regard d'une roue polaire calée avec le rotor qui permet de repérer les alternances pôle SUD-pôle NORD, donc de fournir une image de la position du rotor. Quand le pôle nord passe devant un capteur de position, le capteur indique un « 1 » logique et indique « 0 » pour le pôle sud. La forme du signal fourni par un capteur de position est illustrée par la figure 2-7. Sur cette figure, T_r correspond à la période de rotation mécanique du rotor et T_s à la période électrique, avec $T_r = pT_s$ où p est le nombre de paires de pôles.

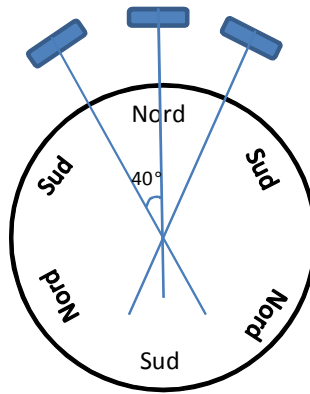


Figure 2-6 : Placement des capteurs de position par rapport à la roue polaire

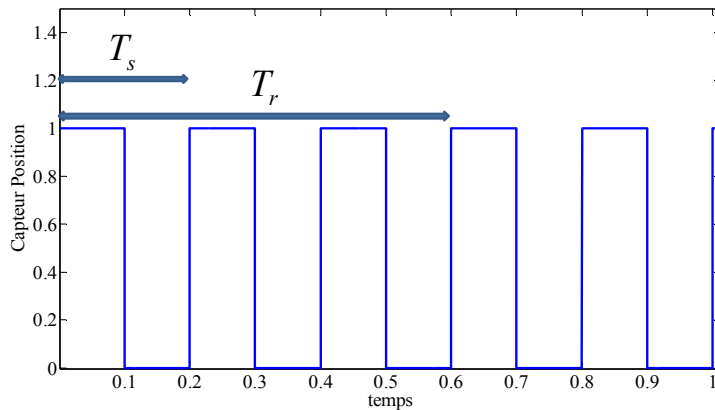


Figure 2-7 : Forme d'onde du signal issu d'un des capteurs de position

Si la pulsation de rotation mécanique de l'actionneur est considérée comme parfaitement constante, ($\omega_r = \frac{2\pi}{T_s} = cte$), le signal de capteur de position $x_p(t)$ est décomposable en série de Fourier :

$$x_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n e^{j2\pi n \frac{t}{T_s}} \quad (2-1)$$

où a_n représente les coefficients de la série de Fourier complexe :

$$a_n = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} x_p(t) e^{-j2\pi n \frac{t}{T_s}} dt \quad (2-2)$$

$$a_n = \frac{1}{T_s} \int_0^{\frac{T_s}{2}} e^{-j2\pi n \frac{t}{T_s}} dt = \frac{1}{\pi n} e^{-\frac{j\pi n}{2}} \sin \frac{\pi n}{2} \quad (2-3)$$

Il est donc possible d'écrire le signal issu du capteur de position sous la forme suivante :

$$x_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{\pi n} e^{-\frac{j\pi n}{2}} \sin \frac{\pi n}{2} \right) e^{j2\pi n \frac{t}{T_s}} \quad (2-4)$$

La transformée de Fourier de ce signal est :

$$\hat{x}_p(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{\pi n} e^{-\frac{j\pi n}{2}} \sin \frac{\pi n}{2} \right) \delta(f - nf_s) \quad (2-5)$$

où $f_s = \frac{1}{T_s}$ est la fréquence statorique en Hz.

Pour n pair, le terme $\sin(n\pi/2)$ est nul. Les harmoniques du signal capteur de position sont donc uniquement des multiples impairs de la fréquence statorique f_s . Le signal de position contient donc en mode normal les harmoniques multiples impairs de la fréquence statorique, autrement dit les harmoniques de la famille : $(2k + 1)f_s$

La figure 2-8 représente, pour un signal de synthèse, la TF (transformée de Fourier) du signal issu du capteur de position pour une vitesse de 12000 tr/min ($f_s = 600 \text{ Hz}$).

Les trois signaux délivrés par le capteur de position diffèrent simplement par leurs phases du fait de leur décalage géométrique. Leur spectres d'amplitudes sont donc identiques (seul le spectre de phase change).

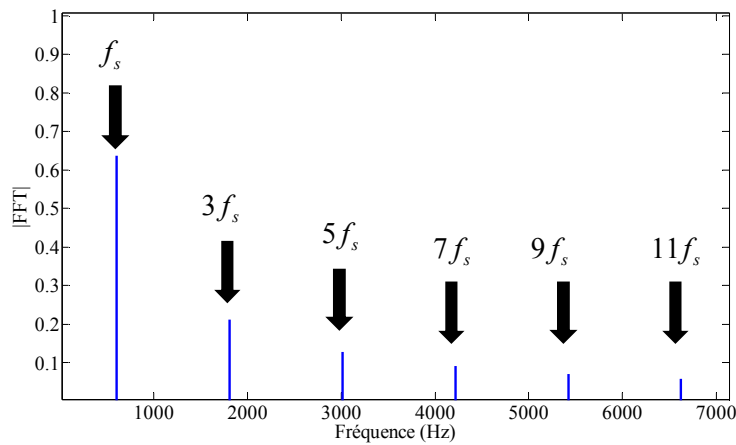


Figure 2-8 : Spectre d'amplitude du signal position

2.4 Contenu fréquentiel du courant statorique en mode sain

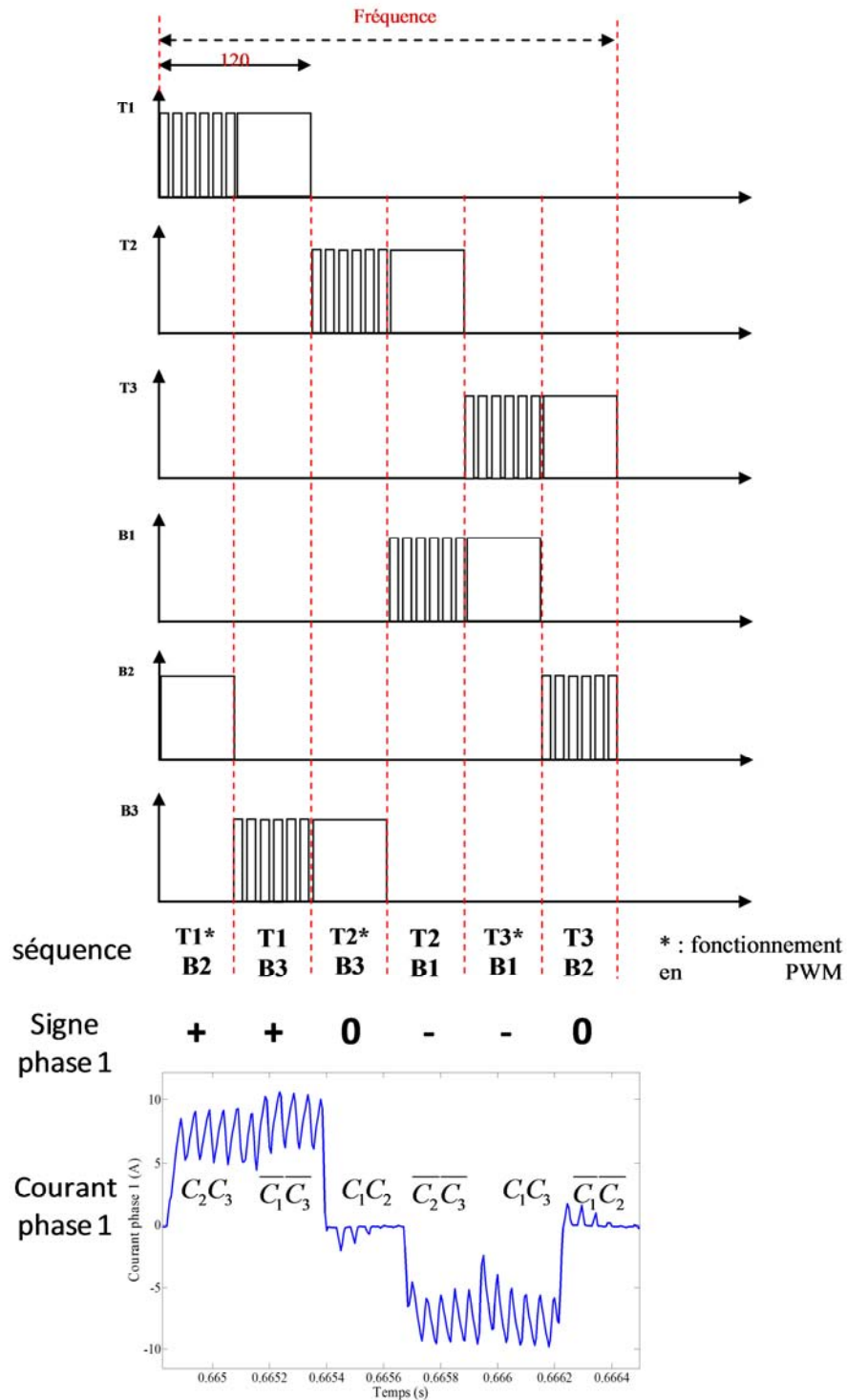


Figure 2-9 : Loi de commande des interrupteurs en fonction des capteurs de position

L'onduleur associé à la machine synchrone à aimants permanents est un onduleur triphasé classique à trois bras, commandé en utilisant les 3 signaux des capteurs de position (C_1, C_2, C_3) suivant la loi de commande décrite sur la figure 2-9. Quand les interrupteurs T1 et (B2 ou B3) sont passants, le courant de la phase 1 est positif, quand les interrupteurs (T2 ou T3) et B1 sont passants, le courant de la phase 1 est négatif. Dans les autres cas le courant de la phase 1 est quasi nul. L'état des capteurs de position pour chacune de ces séquences est également présenté. Pour simplifier l'analyse du courant statorique, le découpage lié à la MLI est négligé, le signal courant est alors équivalent à un signal rectangulaire 120° , comme le montre la figure 2-10.

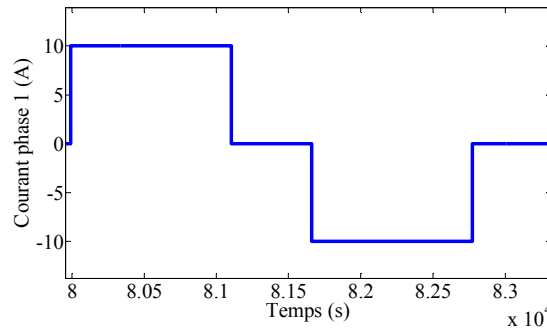


Figure 2-10 : Forme du courant statorique sans MLI sur une période

Le signal courant phase 1, $I_{p1}(t)$ est décomposable en série de Fourier :

$$I_{p1}(t) = \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\alpha_n \cos \frac{2\pi n t}{T_s} + \beta_n \sin \frac{2\pi n t}{T_s} \right] \quad (2-6)$$

$\alpha_n = 0$ (Pour un signal $I_{p1}(t)$ pair)

$$\beta_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}+t_0}^{\frac{T}{2}+t_0} I_{p1}(t) \sin \frac{2\pi n t}{T_s} dt$$

En remplaçant α_n et β_n par leurs valeurs, l'expression du courant de phase devient :

$$I_{p1}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-2}{\pi n} \left[\cos \frac{\pi n}{6} - \cos \frac{5\pi n}{6} \right] \sin \frac{2\pi n t}{T_s} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\pi n} \left[\sin \frac{\pi n}{2} \sin \frac{\pi n}{3} \right] \sin \frac{2\pi n t}{T_s} \quad (2-7)$$

La transformée de Fourier de ce signal s'exprime sous la forme :

$$\hat{I}_{p1}(f) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\pi n} \left[\sin \frac{\pi n}{2} \sin \frac{\pi n}{3} \right] \delta(f \pm n f_s) \quad (2-8)$$

Pour les n multiples de 2 ou 3, $\hat{I}_{p1}(f) = 0$, donc le courant de phase $I_{p1}(t)$ ne contient que les harmoniques de la famille $(6k \pm 1)f_s$.

2.5 Contenu fréquentiel du courant d'onduleur en mode sain

Si l'on observe la figure 2-9, on constate qu'à l'échelle d'une période électrique T_s , six séquences différentes ont lieu au niveau de la commande des interrupteurs de l'onduleur. Comme l'illustre le tableau 2-1, le courant d'entrée de l'onduleur s'obtient en associant ces six séquences de sorte que :

T_1B_2	T_1B_3	T_2B_3	T_2B_1	T_3B_1	T_3B_2
$I_{OND} = I_{T1}$	$I_{OND} = I_{B3}$	$I_{OND} = I_{T2}$	$I_{OND} = I_{B1}$	$I_{OND} = I_{T3}$	$I_{OND} = I_{B2}$

Tableau 2-1 : Courant d'onduleur en fonction des courant les transistors

Si l'on néglige l'effet de la MLI et en considérant les courants de phase parfaits (onde à 120°), la forme d'onde du courant d'entrée de l'onduleur est donnée sur la figure 2-11.

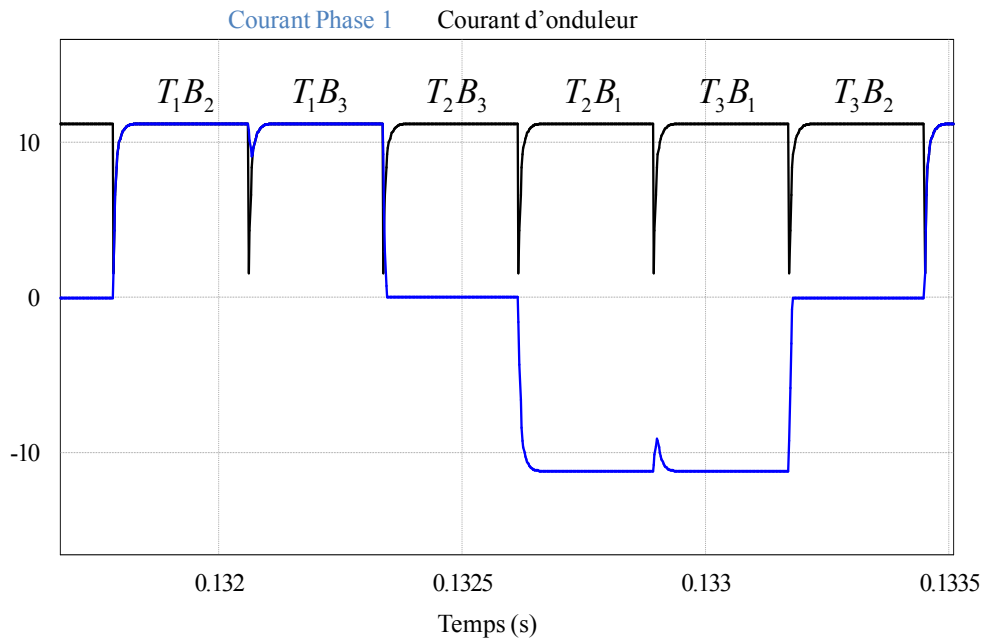


Figure 2-11 : Forme d'onde du courant de phase et du courant d'onduleur sur une période électrique

L'effet des commutations visible sur le courant onduleur est lié aux changements de séquences de pilotage des interrupteurs. Il entraîne un phénomène périodique de période $\frac{T_s}{6}$. Le spectre de courant d'onduleur contient donc les harmoniques multiples de la fréquence $6f_s$. Nous remarquons que les harmoniques du courant d'onduleur et du courant de phase sont liés par la relation :

$$6kf_s \quad \overset{\pm f_s}{\longleftrightarrow} \quad (6k \pm 1)f_s \quad (2-9)$$

Récapitulatif

Le tableau 2-2 résume, pour un régime de fonctionnement sain et à vitesse de rotation constante, le contenu harmonique des signaux vitesse, position et courant de phase.

	Régime de fonctionnement Sain
Vitesse	Composante continue
Position	$(2k + 1)f_s$ avec $k = 0,1, \dots \infty$
Courant de Phase	$(6k \pm 1)f_s$ avec $k = 0,1, \dots \infty$
Courant Onduleur	$6kf_s$ avec $k = 0,1, \dots \infty$

Tableau 2-2 : Contenu fréquentiel théorique des signaux Vitesse, Position et Courant de phase en mode sain

2.6 Oscillation de la vitesse

En réalité, la vitesse de rotation n'est pas tout à fait constante. Le contenu fréquentiel des signaux s'en trouve alors impacté. La vitesse peut varier pour diverses raisons liées par exemple à l'imperfection des régulations, à un défaut d'équilibrage de la machine, ou à des perturbations aérauliques par exemple. De plus, comme nous le verrons ultérieurement, elle peut également être impactée par la présence de défauts sur la partie mécanique. L'intérêt d'étudier l'impact d'une variation de vitesse prend dans ce contexte une importance accrue.

Pour modéliser une variation de vitesse, nous considérons dans la suite de ce travail que la pulsation de rotation mécanique présente une oscillation d'amplitude $\Delta\omega_r$ à une fréquence f_{osc} et s'exprime par :

$$\omega_r' = \omega_r - \Delta\omega_r \sin(\omega_{osc}t) \quad (2-10)$$

Compte tenu de la valeur du nombre de paires de pôles p , ceci entraîne pour la pulsation électrique l'expression :

$$\omega_s' = \omega_s - \Delta\omega \sin(\omega_{osc}t) \quad \text{avec } \omega_r' = \omega_s'/p \text{ et } \Delta\omega_r \Delta\omega = \Delta\omega/p \quad (2-11)$$

2.6.1 Influence d'une oscillation de vitesse sur le signal capteur de position

Recalculons le signal issu du capteur position en considérant maintenant la vitesse de rotation mécanique précédemment définie. La position angulaire est l'intégrale de la vitesse :

$$\theta = \int \omega_s' = \omega_s t + \frac{\Delta\omega}{\omega_{osc}} \cdot \cos(\omega_{osc}t) \quad (2-12)$$

Le signal de position devient dans ce cas :

$$\begin{aligned}
 x_p(t) &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{\pi n} e^{\frac{-j\pi n}{2}} \sin \frac{\pi n}{2} \right) e^{jn\theta} \\
 x_p(t) &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{\pi n} e^{\frac{-j\pi n}{2}} \sin \frac{\pi n}{2} \right) e^{jn(\omega_s t + \frac{\Delta\omega}{\omega_{osc}} \cos(\omega_{osc} t))} \\
 x_p(t) &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{\pi n} e^{\frac{-j\pi n}{2}} \sin \frac{\pi n}{2} \right) e^{jn(\omega_s t)} \cdot e^{jn \frac{\Delta\omega}{\omega_{osc}} \cos(\omega_{osc} t)}
 \end{aligned}$$

D'après la décomposition de Jacobi-Anger [102][103]:

$$e^{j\beta \cos \alpha} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} j^k J_k(\beta) e^{jk\alpha} \quad (2-13)$$

avec $J_k(\beta)$ le k ième ordre de la fonction de Bessel [102][103].

$$e^{jn \frac{\Delta\omega}{\omega_{osc}} \cos(\omega_{osc} t)} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} j^k J_k \left(\frac{n\Delta\omega}{\omega_{osc}} \right) e^{jk\omega_{osc} t}$$

La transformée de Fourier de ce terme est donc :

$$FFT \left[e^{jn \frac{\Delta\omega}{\omega_{osc}} \cos(\omega_{osc} t)} \right] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} j^k J_k \left(\frac{n\Delta\omega}{\omega_{osc}} \right) \delta(f - kf_{osc}) \quad (2-14)$$

La transformée de Fourier $\hat{x}_p(f)$ du signal position $x_p(t)$ devient le produit de convolution de la transformée de Fourier des deux termes :

$$\begin{aligned}
 \hat{x}_p(f) &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{\pi n} e^{\frac{-j\pi n}{2}} \sin \frac{\pi n}{2} \right) \delta(f - kf_s) * \sum_{k=-\infty}^{+\infty} j^k J_k \left(\frac{n\Delta\omega}{\omega_{osc}} \right) \delta(f - kf_{osc}) \\
 \hat{x}_p(f) &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{\pi n} e^{\frac{-j\pi n}{2}} \sin \frac{\pi n}{2} \right) \sum_{k=-\infty}^{+\infty} j^k J_k \left(\frac{n\Delta\omega}{\omega_{osc}} \right) \delta(f - nf_s - kf_{osc})
 \end{aligned} \quad (2-15)$$

La formule généralisée des fonctions de Bessel est donné en (2-16). La figure 2-12 représente les fonctions de Bessel d'ordre zéro jusqu'à 5.

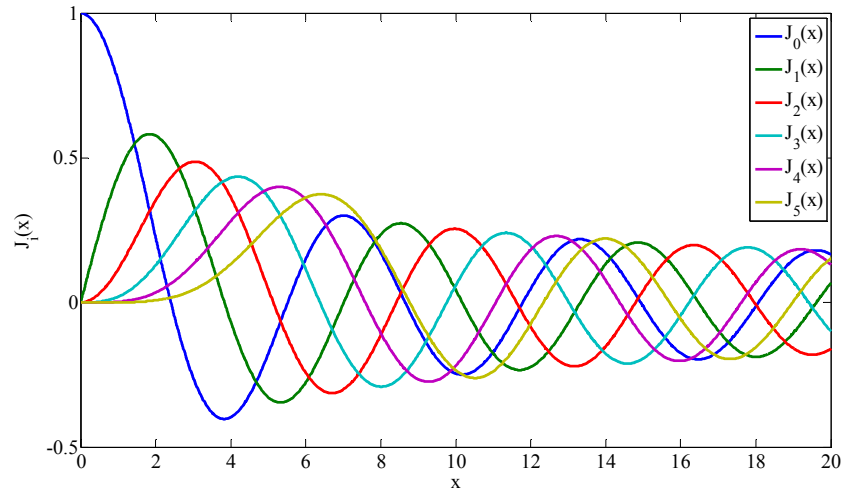


Figure 2-12 : Fonctions de Bessel

$$J_n(x) = \left(\frac{x}{2}\right)^n \sum_{P=0}^{\infty} \frac{(-1)^P}{2^{2P} P! (n+P)!} x^{2P} \quad (2-16)$$

Nous remarquons ainsi que les valeurs de $J_n(x)_{x \rightarrow 0}$ sont négligeables à partir de $n > 1$. Pour simplifier l'expression du terme $J_n(x)$, considérons seulement le terme de la série pour $P = 0$, nous obtenons :

$$J_n(x)_{x \rightarrow 0} = \left(\frac{x}{2}\right)^n \frac{1}{n!} \quad (2-17)$$

Revenons à l'expression (2-15). La valeur de $\frac{n\Delta\omega}{\omega_{osc}}$ est généralement petite, en effet, pour une vitesse de rotation de 12000 tr/min, l'erreur maximale est de 75 tr/min (spécification de la régulation de vitesse), la valeur maximale de $\Delta\omega$ est donc de l'ordre de :

$$\Delta\omega = 2\pi\Delta f_s = 2\pi \times \frac{75}{20} = 23,5 \text{ rad/s}$$

Une approximation du terme $J_k\left(\frac{n\Delta\omega}{\omega_{osc}}\right)$ peut ainsi être donnée par :

$$J_k\left(\frac{n\Delta\omega}{\omega_{osc}}\right) = \frac{\left[\frac{n\Delta\omega}{2\omega_{osc}}\right]^k}{k!} \quad (2-18)$$

$$J_0\left(\frac{n\Delta\omega}{\omega_{osc}}\right) = 1 \quad \text{et} \quad J_1\left(\frac{n\Delta\omega}{\omega_{osc}}\right) = \frac{n\Delta\omega}{2\omega_{osc}}$$

Pour $k > 1$, le terme $J_k\left(\frac{n\Delta\omega}{\omega_{osc}}\right)$ devient négligeable, il ne faut donc prendre en considération que les deux premiers termes.

2.6.2 Influence d'une oscillation de vitesse sur le courant statorique

En reconsidérant les équations (2-7) et (2-12), l'expression du signal courant phase 1 est la suivante :

$$\begin{aligned}
 I_{p1}(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4}{\pi k} \left[\sin \frac{\pi k}{2} \sin \frac{\pi k}{3} \right] \sin \left[k\omega_s t + k \frac{\Delta\omega}{\omega_{osc}} \cdot \cos(\omega_{osc} t) \right] \\
 I_{p1}(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4}{\pi k} \left[\sin \frac{\pi k}{2} \sin \frac{\pi k}{3} \right] \left[\sin(k\omega_s t) \cos \left[k \frac{\Delta\omega}{\omega_{osc}} \cdot \cos(\omega_{osc} t) \right] \right. \\
 &\quad \left. + \cos(k\omega_s t) \sin \left[k \frac{\Delta\omega}{\omega_{osc}} \cdot \cos(\omega_{osc} t) \right] \right] \quad (2-19)
 \end{aligned}$$

En utilisant les décompositions de Jacobi-Anger et les fonctions de Bessel, la forme finale du courant dans le cas d'une oscillation de vitesse devient :

$$\begin{aligned}
 I_{p1}(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8}{\pi n} \left[\sin \frac{\pi k}{2} \sin \frac{\pi k}{3} \right] \left[\sin(k\omega_s t) \sum_{n=1}^{\infty} \left[(-1)^n J_{2n} \left(k \frac{\Delta\omega}{\omega_{osc}} \right) \cos(2n\omega_{osc} t) \right] \right. \\
 &\quad \left. - \cos(k\omega_s t) \sum_{n=1}^{\infty} \left[(-1)^n J_{2n-1} \left(k \frac{\Delta\omega}{\omega_{osc}} \right) \cos((2n-1)\omega_{osc} t) \right] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\sin(k\omega_s t)}{2} J_0 \left(k \frac{\Delta\omega}{\omega_{osc}} \right) \right] \quad (2-20)
 \end{aligned}$$

La transformée de Fourier de ce signal contient donc les harmoniques à $(6k \pm 1)f_s \pm nf_{osc}$

$$\begin{aligned}
 \hat{I}_{p1}(f) &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8}{\pi k} \left[\sin \frac{\pi k}{2} \sin \frac{\pi k}{3} \right] \left[\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^n}{2i} J_{2n} \left(k \frac{\Delta\omega}{\omega_{osc}} \right) \delta(f \pm kf_s \pm 2nf_{osc}) \right] \right. \\
 &\quad \left. - \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^n}{2} J_{2n-1} \left(k \frac{\Delta\omega}{\omega_{osc}} \right) \delta(f \pm kf_s \pm (2n-1)f_{osc}) \right] + \frac{J_0 \left(k \frac{\Delta\omega}{\omega_{osc}} \right)}{4i} \delta(f \pm f_s) \right] \quad (2-21)
 \end{aligned}$$

2.6.3 Influence d'une oscillation de vitesse sur le courant onduleur

Les modulations induites par la présence d'une oscillation de vitesse sur le signal du capteur de position et du capteur de courant vont se retrouver sur le courant d'entrée de l'onduleur. En effet, en présence d'une oscillation de vitesse à la fréquence f_{osc} , le courant de phase est, nous l'avons montré, modulé par cette fréquence. Puisque le courant d'onduleur est directement lié au courant de phase par les séquences de commande, le courant d'onduleur sera également modulé à cette fréquence. Nous attendons donc, en plus des harmoniques à $6kf_s$ déjà présents, une nouvelle famille harmoniques à $6kf_s \pm f_{osc}$ (incluant le cas où $k = 0$, c'est-à-dire l'harmonique à f_{osc}).

Récapitulatif

Le tableau 2-3 récapitule le contenu fréquentiel des signaux vitesse, position, courant de phase et courant onduleur avec et sans oscillation de vitesse. Quelle qu'en soit la cause, l'apparition d'une oscillation de vitesse à une fréquence f_{osc} fait apparaître des harmoniques additionnels dans les différents signaux étudiés. Remarquons également dans ce tableau que s'il existe plusieurs harmoniques sur la vitesse, chacun d'entre eux va générer sa propre famille harmonique qui viendra s'ajouter aux autres familles fréquentielles.

	Sain	Sain + oscillation vitesse	Sain + oscillations de vitesses à $f_{osc(i)}$
Vitesse	Composante continue	Composante continue + oscillation à f_{osc}	Composante continue + oscillations à $f_{osc(i)}$
Position	$(2k + 1)f_s$	$(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$	$(2k + 1)f_s$ $\sum [(2k + 1)f_s \pm f_{osc(i)}]$
Courant statorique	$(6k \pm 1)f_s$	$(6k \pm 1)f_s$ $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$	$(6k + 1)f_s$ $\sum [(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc(i)}]$
Courant Onduleur	$6kf_s$	$6kf_s$ $6kf_s \pm f_{osc}$	$6kf_s$ $\sum [6kf_s \pm f_{osc(i)}]$

Tableau 2-3 : Récapitulatif du contenu fréquentiel des signaux étudiés en présence d'oscillation sur la vitesse

2.7 Influence des imperfections de construction sur le signal capteur de position

Jusqu'à maintenant, la machine était supposée de construction parfaitement symétrique avec les aimants de la roue polaire et les capteurs de position considérés comme parfaitement calés, ce qui n'est généralement pas tout à fait le cas. Nous allons donc nous intéresser à l'effet du décalage des capteurs et des aimants de la roue polaire sur le contenu fréquentiel du signal de position.

2.7.1 Imperfection dans le calage d'un aimant de la roue polaire

Dans le cas d'un décalage de l'un des aimants, il est considéré que l'aimant change de position sur la roue polaire (figure 2-13) par décalage d'un angle α_a . Le capteur de position percevra donc ce décalage de l'aimant qui se traduira par un décalage angulaire de l'un des créneaux constituant la réponse du capteur au passage des aimants.

2.7 Influence des imperfections de construction sur le signal capteur de position

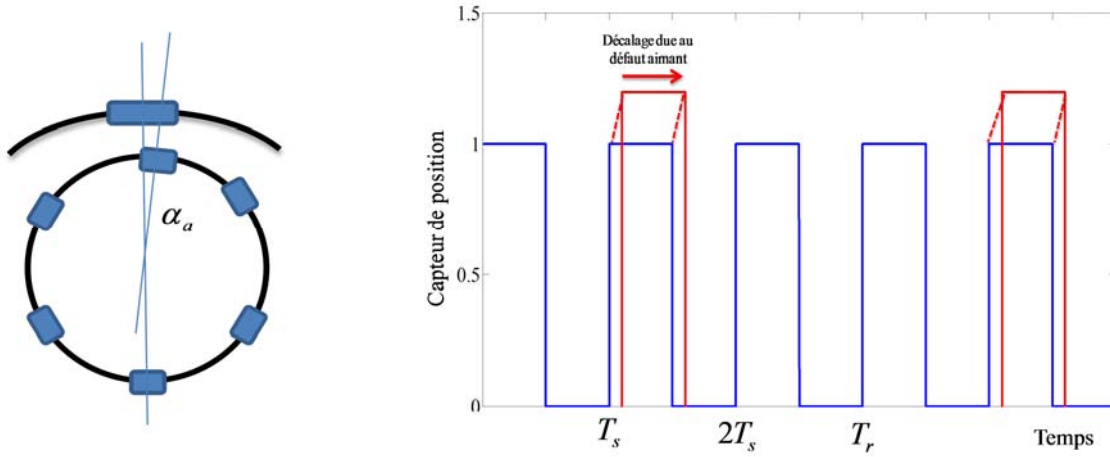


Figure 2-13 : Signal capteur de position en présence d'un décalage aimant

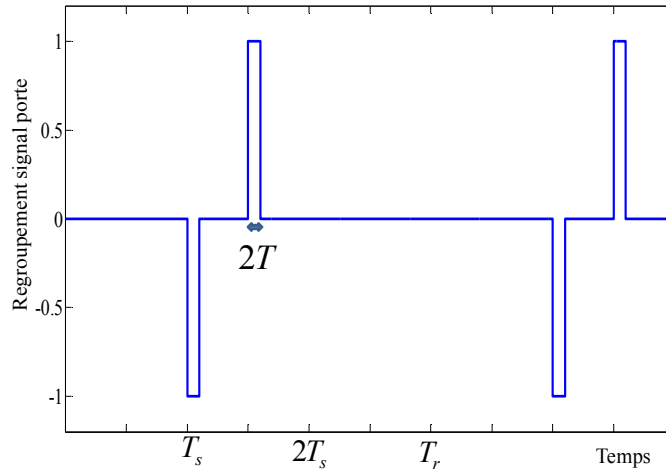


Figure 2-14 : Signal $x_{da}(t)$ rajouté au signal capteur de position sain en présence d'un décalage aimant

où α_a est l'angle de décalage de l'aimant. Cet angle est au maximum de $\pm 2^\circ$ mécaniques d'après les données du fabricant.

La nouvelle forme du signal capteur est donc, en considérant ω_r constant, la somme du signal capteur sans défaut $x_p(t)$ avec un signal $x_{da}(t)$ périodique de période $3T_s$. Il est représenté sur la figure 2-14, où la durée $2T$ est l'image temporelle de l'angle α_a de sorte que :

$$\alpha_a = 2\omega T \quad (2-22)$$

Le signal $x_{p_{da}}(t)$, qui représente le signal issu du capteur de position en présence d'un décalage d'aimant, peut s'exprimer sous la forme :

$$x_{p_{da}}(t) = x_p(t) + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_{da}(t - 3nT_s) \quad (2-23)$$

En passant dans le domaine fréquentiel, on obtient :

$$\hat{x}_{pda}(f) = \hat{x}_p(f) + \frac{2}{j} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{T_r} 2T \frac{\sin\left(\frac{2\pi T n}{T_r}\right)}{\frac{2\pi T n}{T_r}} e^{-j\frac{2\pi(T+T_s)n}{T_r}} e^{j\frac{\pi n}{6}} \sin\frac{\pi n}{6} \delta(f - n f_r) \quad (2-24)$$

Récapitulatif

Le décalage d'un aimant de la roue polaire rajoute donc au signal capteur de position des harmoniques sur les fréquences multiples de la fréquence de rotation. Le tableau 2-4 résume ces résultats.

	Sain	Sain + décalage aimant
Vitesse	Composante continue	Composante continue
Position	$(2k + 1)f_s$	$(2k + 1)f_s$ et $k'f_r$ avec $k' = 1, 2, \dots, \infty$

Tableau 2-4 : Contenu fréquentiel des signaux de position en présence d'un décalage aimant

2.7.2 Imperfection de calage d'un capteur de position

Considérons maintenant une imperfection de construction liée au positionnement de l'un des capteurs de position. Le décalage est maintenant situé au niveau du capteur qui peut être légèrement décalé d'un angle α_c par rapport à sa position idéale. Dans ce cas, dans le domaine temporel et comme le montre la figure 2-15, le signal issu du capteur de position est décalé de $2T$, avec :

$$\alpha_c = 2\omega T \quad (2-25)$$

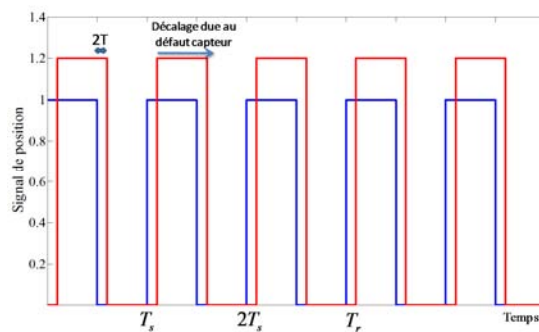
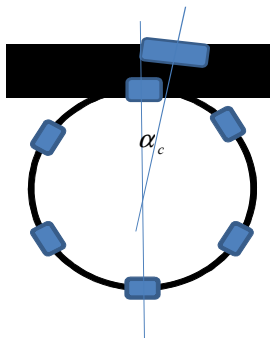


Figure 2-15 : Signal capteur de position en présence d'un décalage de capteur

α_c , l'angle de décalage capteur est au maximum égal à $\pm 2^\circ$ mécaniques. Le signal $x_{p_{dc}}(t)$ peut alors s'exprimer sous la forme :

$$x_{p_{dc}}(t) = x_p(t - 2T) \quad (2-26)$$

$$\text{d'où : } \hat{x}_{p_{dc}}(f) = e^{-j2\pi \cdot 2Tf} \cdot \hat{x}_p(f) \quad (2-27)$$

Récapitulatif

Le décalage d'un capteur de position ne change donc pas le contenu fréquentiel du signal issu du capteur de position. Seul les amplitudes de ces harmoniques seront affectées, mais de manière négligeable compte tenu de la faible valeur de l'angle de décalage considéré. Le tableau 2-5 résume les résultats pour les signaux de vitesse et de position.

	Sain	Sain + décalage aimant	Sain + décalage capteur
Vitesse	Composante continue seulement	Composante continue seulement	Composante continue seulement
Position	$(2k + 1)f_s$	$(2k + 1)f_s$ $k'f_r$	$(2k + 1)f_s$

Tableau 2-5 : Contenu fréquentiel du signal capteur de position en présence d'un décalage aimant ou capteur

Notons que la présence d'une oscillation de vitesse en plus d'un défaut de construction entraîne l'apparition de familles fréquentielles supplémentaires décrites dans le tableau 2-6.

	Sain	Sain + défaut aimant+ oscillation vitesse	Sain + décalage capteur+ oscillation vitesse
Vitesse	Composante continue	Composante continue + oscillation à f_{osc}	Composante continue + oscillation à f_{osc}
Position	$(2k + 1)f_s$	$(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$ $k'f_r$ $k'f_r \pm f_{osc}$	$(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$

Tableau 2-6 : Contenu fréquentiel des signaux vitesse et capteur de position en présence d'imperfections de construction et d'une oscillation de vitesse

2.8 Influence des imperfections de construction sur le courant statorique

2.8.1 Défaut de calage d'un aimant de la roue polaire

Si l'un des aimants est décalé par rapport à sa position idéale, le signal issu du capteur de position comporte, nous l'avons vu, des harmoniques additionnels aux multiples de la fréquence de rotation f_r . Comme ce signal est directement lié aux ordres de commande de l'onduleur, le signal courant statorique comportera également des harmoniques aux multiples de f_r en présence d'un décalage aimant.

2.8.2 Défaut de calage d'un capteur de position

Si l'un des capteurs est décalé par rapport à sa position idéale, le contenu du signal issu du capteur de position n'est, nous l'avons vu, pas modifié. Il comporte seulement des harmoniques de la famille $(2k + 1)f_s$. Cependant, comme le courant statorique est obtenu par composition des signaux issus des trois capteurs de position, le décalage de l'un d'entre eux par rapport aux 2 autres pourra engendrer, selon les cas, l'apparition d'autres familles de fréquences.

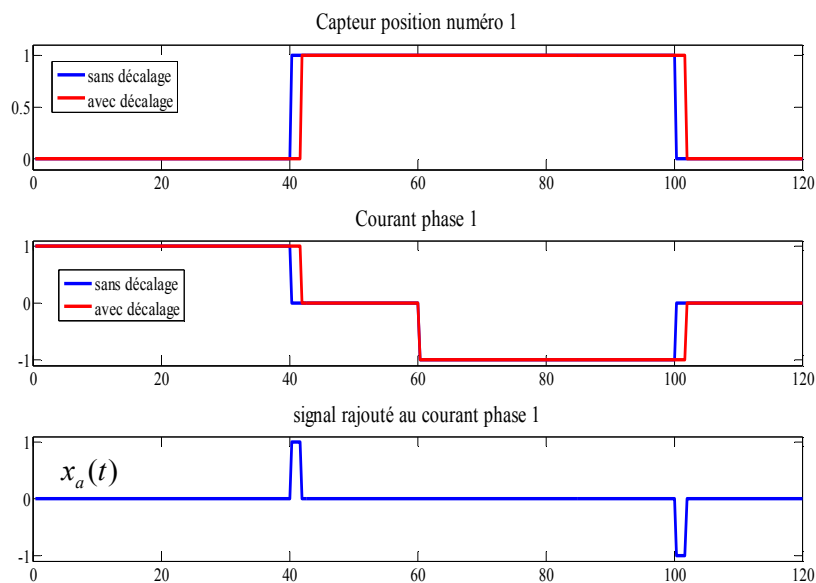


Figure 2-16 : Influence d'un décalage de capteur de position sur le courant statorique

La figure 2-16 montre par exemple l'influence du décalage d'un capteur de position sur le courant statorique de la phase 1. On note $x_a(t)$ le signal rajouté au courant statorique phase 1. Nous pouvons découper le signal $x_a(t)$ en deux signaux de type porte de largeur T_1 et décalés de $\frac{T_s}{2}$. Pour simplifier le calcul, nous supposons le premier signal porte centré sur l'instant $t = 0$.

Dans ce cas nous pouvons écrire le signal $x_a(t)$ sous la forme suivante :

$$x_a(t) = \prod_{\frac{T_1}{2}}(t) - \prod_{\frac{T_1}{2}}(t - \frac{T_s}{2}) \quad (2-28)$$

La transformée de Fourier de ce signal est donnée par la formule :

$$\begin{aligned} \hat{x}_a(f) &= T_1 \frac{\sin \pi T_1 f}{\pi T_1 f} - T_1 \frac{\sin \pi T_1 f}{\pi T_1 f} e^{-j\pi T_s f} \\ \hat{x}_a(f) &= T_1 \frac{\sin \pi T_1 f}{\pi T_1 f} [1 - e^{-j\pi T_s f}] \\ \hat{x}_a(f) &= 2jT_1 \frac{\sin \pi T_1 f}{\pi T_1 f} e^{-j\pi \frac{T_s}{2} f} \frac{[e^{j\pi \frac{T_s}{2} f} - e^{-j\pi \frac{T_s}{2} f}]}{2j} \\ \hat{x}_a(f) &= 2jT_1 \frac{\sin \pi T_1 f}{\pi T_1 f} e^{-j\pi \frac{T_s}{2} f} \sin \pi \frac{T_s}{2} f \end{aligned} \quad (2-29)$$

Désignons par $x_{ap}(t)$ la périodisation du signal $x_a(t)$,

$$x_{ap}(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_a(t + nT_s) \quad (2-30)$$

La transformée de Fourier de ce signal devient :

$$\begin{aligned} \hat{x}_{ap}(f) &= \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \hat{x}_a\left(\frac{n}{T_s}\right) \delta(f - nf_s) \\ \hat{x}_{ap}(f) &= \frac{2jT_1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{\sin \pi T_1 \frac{n}{T_s}}{\pi T_1 \frac{n}{T_s}} e^{-j\pi \frac{T_s n}{2 T_s}} \sin \pi \frac{T_s}{2} \frac{n}{T_s} \delta(f - nf_s) \\ \hat{x}_{ap}(f) &= \frac{2jT_1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{\sin \pi T_1 \frac{n}{T_s}}{\pi T_1 \frac{n}{T_s}} e^{-j\frac{\pi n}{2}} \sin \frac{\pi n}{2} \delta(f - nf_s) \end{aligned} \quad (2-31)$$

Pour les n pairs, $\hat{x}_{ap}(f) = 0$. Le signal $\hat{x}_{ap}(f)$ contient donc seulement les multiples impairs de la fréquence statorique. Le décalage d'un capteur rajoute ainsi au signal courant de phase, des harmoniques de liés à la famille $(2k + 1)f_s$

Récapitulatif

La présence d'imperfections de calage au niveau des aimants et des capteurs entraîne donc sur le courant statorique la présence d'harmoniques dont les caractéristiques sont regroupées dans le tableau 2-7.

	Sain	Sain + décalage aimant	Sain + décalage capteur
Vitesse	Composante continue	Composante continue	Composante continue
Courant	$(6k \pm 1)f_s$	$(6k \pm 1)f_s$ $k'f_r$	$(6k \pm 1)f_s$ $(2k + 1)f_s$

Tableau 2-7 : Contenu fréquentiel du courant statorique en présence d'imperfections de construction

2.9 Influence des imperfections de construction sur le courant d'onduleur

2.9.1 Imperfection de calage d'un aimant de la roue polaire

Si l'un des aimants est décalé par rapport à sa position idéale, le signal issu du capteur de position comporte, nous l'avons vu, des harmoniques additionnels aux multiples de la fréquence de rotation f_r . Comme ce signal est directement lié aux ordres de commande de l'onduleur, le signal courant d'onduleur comportera également, en présence d'un décalage d'aimant, des harmoniques aux multiples de f_r .

2.9.2 Imperfection de calage d'un capteur de position

Considérons maintenant que l'un des capteurs de position soit décalé par rapport à sa position idéale. Le signal issu du capteur de position décalé intervient deux fois par période électrique dans les séquences de commande. Ce décalage va donc créer un harmonique à $2kf_s$ dans le spectre du courant d'onduleur.

Conclusion :

La présence d'imperfections de calage au niveau des aimants et des capteurs entraîne donc sur le courant d'onduleur la présence d'harmonique dont les caractéristiques sont regroupées dans le tableau 2-8.

	Sain	Sain + défaut aimant	Sain + défaut capteur
Vitesse	Composante continue	Composante continue	Composante continue
Courant d'onduleur	$6kf_s$	$6kf_s$ $k'f_r$	$6kf_s$ $2k'f_s$

Tableau 2-8 : Contenu fréquentiel du courant d'onduleur en présence d'imperfections de construction

2.10 Synthèse des contenus harmoniques des signaux

Pour récapituler toutes les familles fréquentielles obtenues sur les signaux position, courant de phase et courant d'onduleur, nous résumons, dans le tableau 2-9, l'ensemble des harmoniques théoriques que nous avons identifiés.

	Sain	Sain + oscillation Vitesse	Sain + décalage aimant	Sain + décalage capteur	Sain + oscillation vitesse + décalage aimant	Sain + oscillation vitesse + décalage capteur
Position	$(2k + 1)f_s$	$(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$	$(2k + 1)f_s$ $k'f_r$	$(2k + 1)f_s$	$(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$ $k'f_r$ $k'f_r \pm f_{osc}$	$(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$
Courant de phase	$(6k \pm 1)f_s$	$(6k \pm 1)f_s$ $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$	$(6k \pm 1)f_s$ $k'f_r$	$(6k \pm 1)f_s$ $(2k + 1)f_s$	$(6k \pm 1)f_s$ $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$ $k'f_r$ $k'f_r \pm f_{osc}$	$(6k \pm 1)f_s$ $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$ $(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$
Courant d'onduleur	$6kf_s$	$6kf_s$ $6kf_s \pm f_{osc}$	$6kf_s$ $k'f_r$	$6kf_s$ $2k'f_s$	$6kf_s$ $6kf_s \pm f_{osc}$ $k'f_r$ $k'f_r \pm f_{osc}$	$6kf_s$ $6kf_s \pm f_{osc}$ $2k'f_s$ $2k'f_s \pm f_{osc}$

Tableau 2-9 : Récapitulatif du contenu fréquentiel des signaux courant et position en mode sain

2.11 Validation du contenu harmonique des signaux par simulation

Afin de valider l'étude analytique théorique précédemment développée, nous proposons, grâce à un outil de simulation numérique, de vérifier si les familles fréquentielles obtenues sont bien présentes. Bien évidemment, nous vérifierons par la suite avec des signaux expérimentaux la présence de toutes ces familles, mais l'approche par simulation permet de s'affranchir dans un premier temps de la richesse harmonique des signaux expérimentaux qui, nous le verrons, rend l'analyse plus complexe.

2.11.1 Analyse des signaux issus du capteur de position

Rappel

	Sain	Sain + oscillation Vitesse	Sain + décalage aimant	Sain + décalage capteur	Sain + oscillation vitesse + décalage aimant	Sain + oscillation vitesse + décalage capteur
Position	$(2k + 1)f_s$	$(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$	$(2k + 1)f_s$ $k'f_r$	$(2k + 1)f_s$	$(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$ $k'f_r$ $k'f_r \pm f_{osc}$	$(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$

Pour étudier par simulation le contenu fréquentiel du signal issu du capteur de position, nous considérons le modèle de simulation présenté sur la figure 2-17.

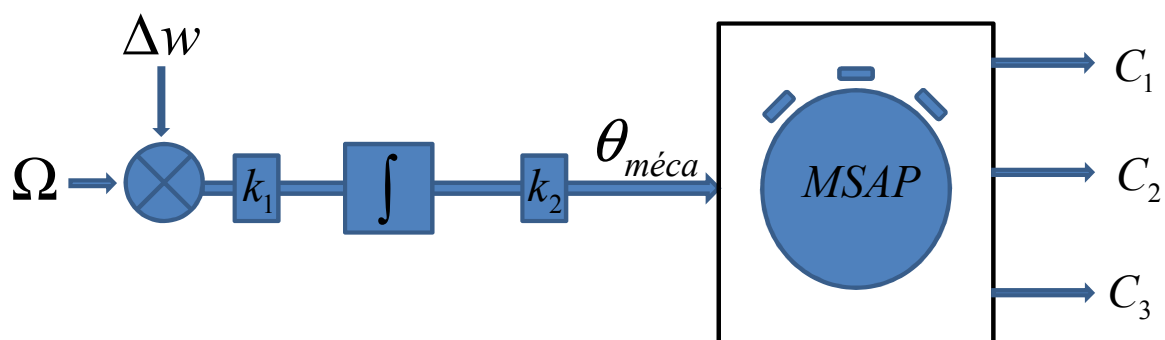


Figure 2-17 : Modèle de reconstruction des signaux issus des capteurs de position en présence d'une oscillation de la vitesse mécanique

Ce modèle permet simplement, à partir de l'imposition d'une vitesse mécanique avec ou sans oscillation, de reconstituer l'allure des signaux fournis par les capteurs de position et d'analyser leur contenu.

■ Cas sain sans oscillation de vitesse ni défaut de construction

Pour une vitesse de 12000 tr/min, nous obtenons le spectre présenté sur la figure 2-18. Dans le cas sain, le spectre du signal de position contient donc bien les harmoniques à $(2k + 1)f_s$, ce qui vérifie bien les résultats obtenus au paragraphe 2.3.

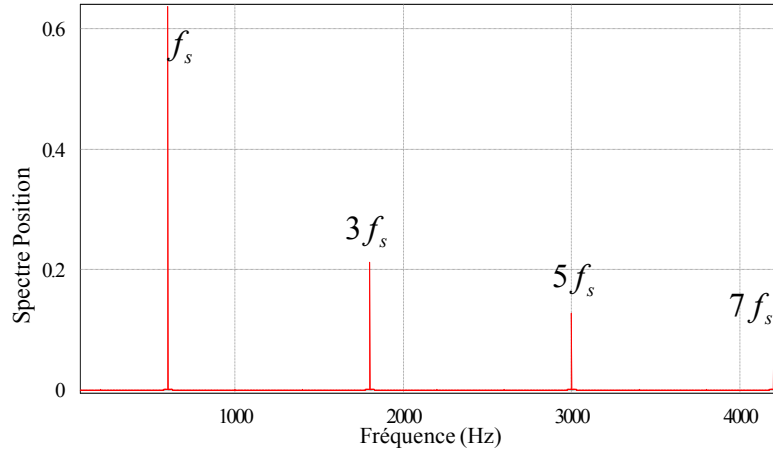


Figure 2-18 : Contenu fréquentiel du spectre du signal de position en cas normal

■ Cas sain avec oscillation de vitesse

Une oscillation de vitesse est maintenant injectée dans la simulation des signaux capteurs de position. Nous adoptons le paramétrage suivant : $\Delta\omega_r = \frac{2\pi}{60} (75 \frac{tr}{min})$ et $f_{osc} = 40$ Hz .

L'étude théorique menée au paragraphe 2.6.1 montre que le signal position contient les harmoniques à $(2k + 1)f_s \pm nf_{osc}$ en présence d'une oscillation de vitesse. La figure 2-19 vérifie bien ces résultats. A partir de $n > 1$, ces harmoniques deviennent négligeables.

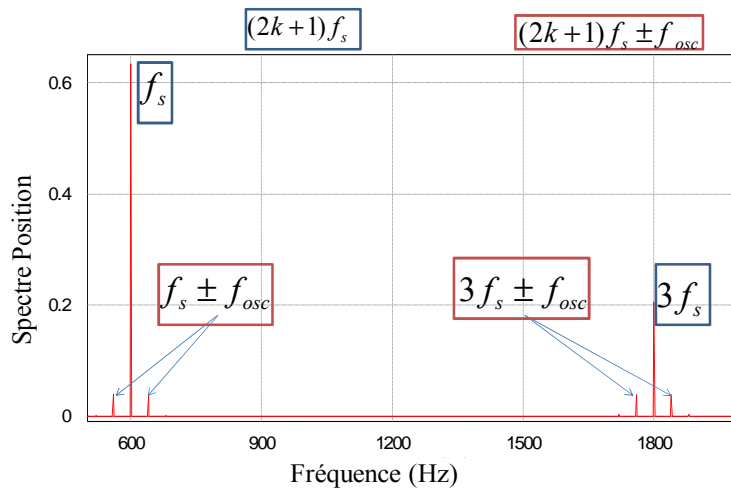


Figure 2-19 : contenu fréquentiel du spectre de position en présence d'une oscillation de vitesse

■ Cas sain avec oscillation de vitesse et décalage d'un capteur de position

Nous allons maintenant étudier, toujours avec des signaux simulés, l'effet du décalage des capteurs de position. Nous maintenons, dans toutes les simulations liées à l'étude du signal de

position, la présence d'une oscillation de vitesse pour permettre d'étudier l'accumulation des phénomènes générateurs d'harmoniques. Dans la simulation, un capteur de position est maintenant décalé de 2° mécaniques. La figure 2-20 représente les résultats obtenus sur le spectre du signal de position. Le décalage d'un capteur de position ne change pas le contenu fréquentiel du signal position, ce qui vérifie bien les résultats théoriques obtenus. Seule la signature de l'oscillation de vitesse est perceptible.

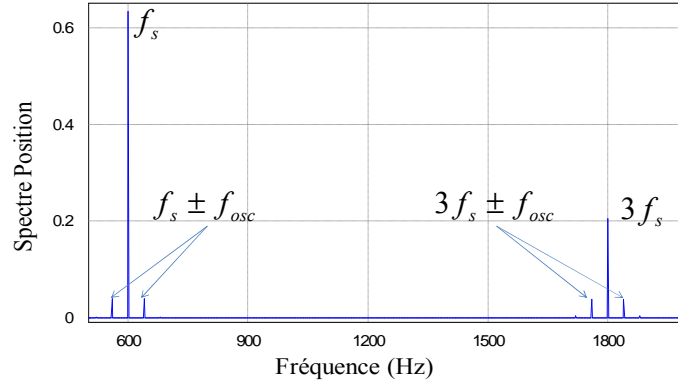


Figure 2-20 : Contenu fréquentiel du spectre de position en présence du décalage d'un capteur de position et d'une oscillation de vitesse

■ Cas sain avec oscillation de vitesse et décalage d'un aimant

Dans ce cas, c'est l'un des aimants qui est décalé de 2° mécaniques par rapport à sa position initiale. La figure 2-21 fait apparaître deux familles d'harmoniques, une à $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$ et la seconde à $k'f_r \pm f_{osc}$, ce qui vérifie les résultats théoriques obtenus au paragraphe 2.7.1.

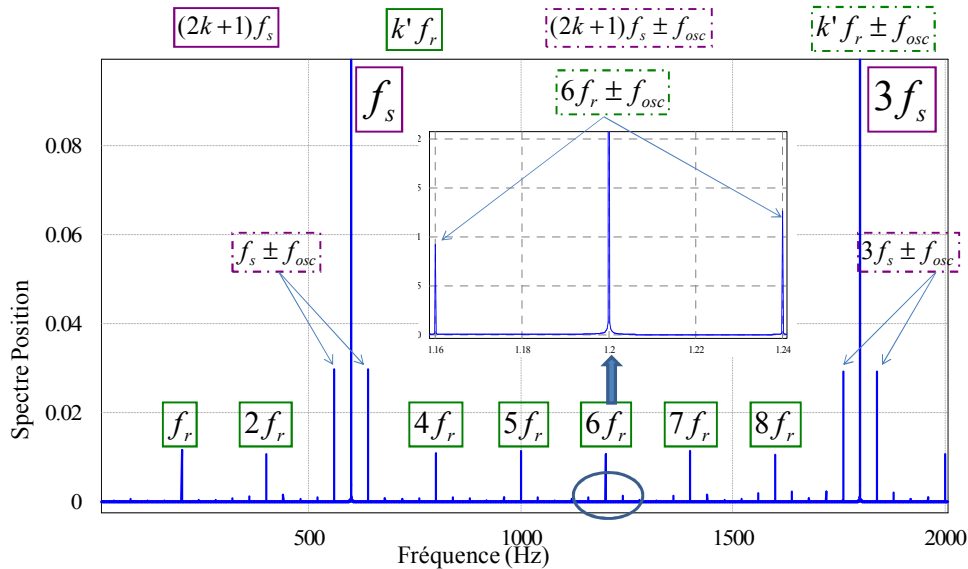


Figure 2-21 : Contenu fréquentiel du signal de position en présence du décalage d'un aimant et d'une oscillation de vitesse

2.11.2 Analyse des signaux de courant statorique

Rappel

	Sain	Sain + oscillation Vitesse	Sain + décalage aimant	Sain + décalage capteur	Sain + oscillation vitesse + décalage aimant	Sain + oscillation vitesse + décalage capteur
Courant de phase	$(6k \pm 1)f_s$	$(6k \pm 1)f_s$ $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$	$(6k \pm 1)f_s$ $k'f_r$	$(6k \pm 1)f_s$ $(2k + 1)f_s$	$(6k \pm 1)f_s$ $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$ $k'f_r$ $k'f_r \pm f_{osc}$	$(6k \pm 1)f_s$ $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$ $(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$

Pour analyser le contenu fréquentiel des courants de phase, un modèle de simulation plus complet de l'équipement est mis en place. Il comporte un modèle de la machine synchrone et de sa charge mécanique et un modèle de l'onduleur et de sa commande.

- Cas sain sans oscillation de vitesse ni imperfection de construction

Le courant statorique contient bien, en régime sain, les harmoniques de la famille $(6k \pm 1)f_s$ comme la montre la figure 2-22. Le spectre du courant y est représenté pour une vitesse de rotation de 12000 tr/min et correspondant à une fréquence statorique de 600 Hz.

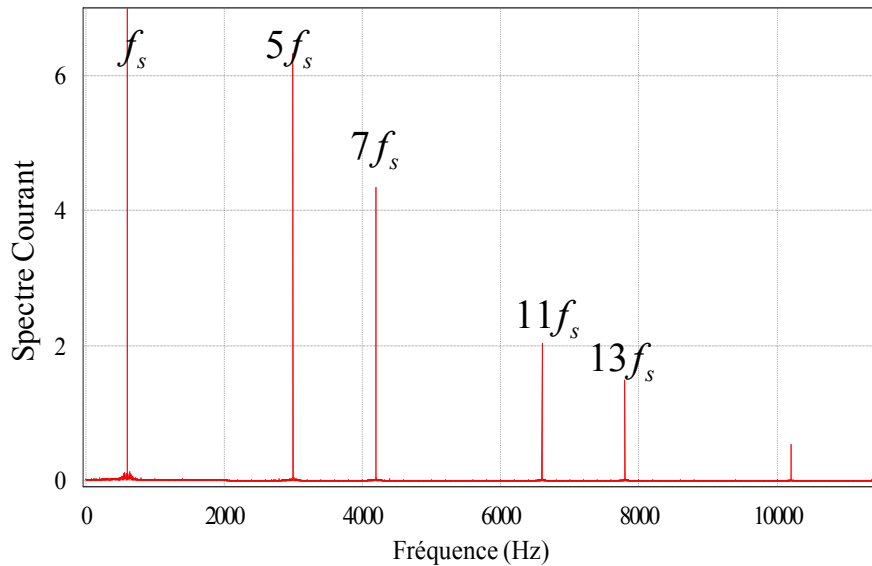


Figure 2-22 : Contenu fréquentiel du spectre de courant simulé en cas sain

▪ Cas sain avec oscillation de vitesse

La figure 2-23 montre le spectre de courant de phase en présence d'une oscillation de vitesse à la fréquence $f_{osc} = 40\text{Hz}$. Nous remarquons que l'oscillation de vitesse fait apparaître sur le spectre de courant des harmoniques à $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$, ce qui correspond bien aux harmoniques théoriquement identifiées.

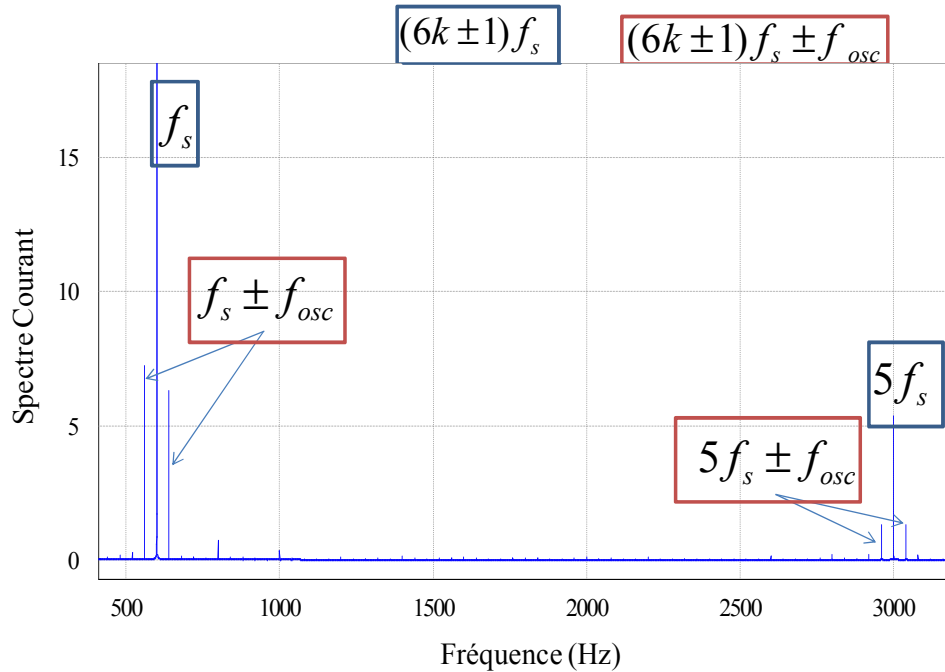


Figure 2-23 : Contenu fréquentiel du spectre de courant simulé en présence d'une oscillation de vitesse

▪ Cas sain avec oscillation de vitesse et décalage d'un aimant

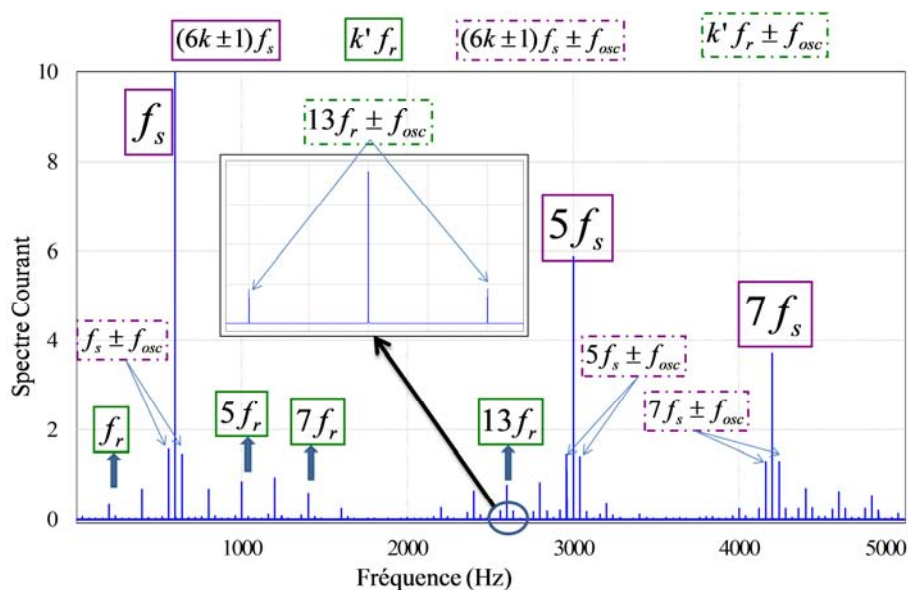


Figure 2-24 : Contenu fréquentiel simulé du spectre de courant en présence d'un décalage aimant et d'une oscillation de vitesse

L'un des aimants est maintenant décalé de 2° mécaniques par rapport à sa position initiale. Sur le spectre du courant de phase (figure 2-24), nous montrons l'apparition des harmoniques à $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$, ainsi qu'une deuxième famille à $k'f_r \pm f_{osc}$. Notons ici que les amplitudes des harmoniques de la famille $k'f_r \pm f_{osc}$ sont très faibles par rapport aux harmoniques principaux du spectre courant.

■ Cas sain avec oscillation de vitesse et décalage d'un capteur

L'un des capteurs est maintenant décalé de 2° mécaniques par rapport à sa position initiale. Sur la figure 2-25, nous pouvons observer que la famille $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$ est toujours présente et nous remarquons l'apparition de la famille $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$.

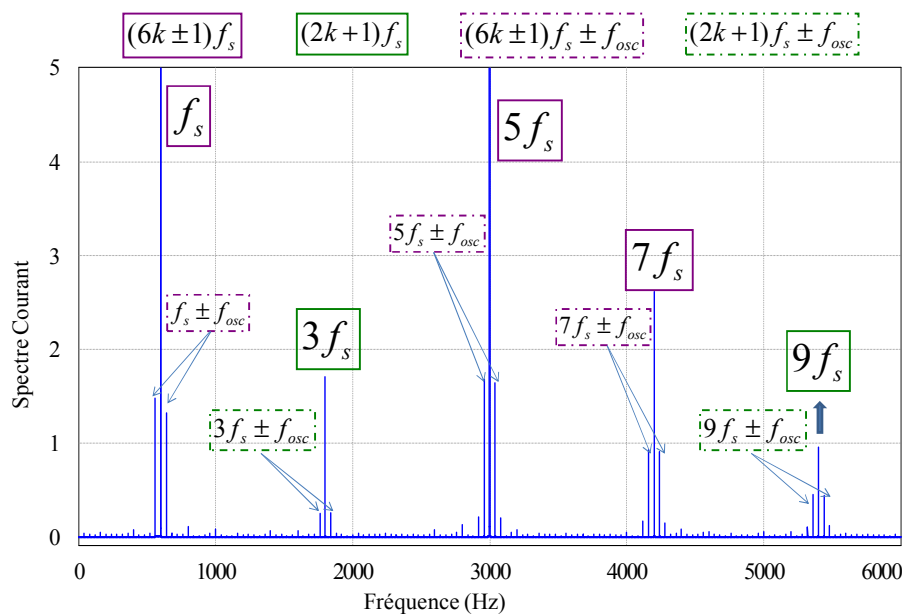


Figure 2-25 : Contenu fréquentiel simulé du spectre de courant en présence d'un décalage capteur et d'une oscillation de vitesse

2.11.3 Analyse du courant d'onduleur

Rappel

	Sain	Sain +oscillation Vitesse	Sain +décalage aimant	Sain +décalage capteur	Sain oscillation vitesse décalage aimant	Sain oscillation vitesse+décalage capteur
Courant d'onduleur	$6kf_s$	$6kf_s$ $6kf_s \pm f_{osc}$	$6kf_s$ $k'f_r$	$6kf_s$ $2k'f_s$	$6kf_s$ $6kf_s \pm f_{osc}$ $k'f_r$ $k'f_r \pm f_{osc}$	$6kf_s$ $6kf_s \pm f_{osc}$ $2k'f_s$ $2k'f_s \pm f_{osc}$

▪ Cas sain

Comme le montre la figure 2-26, le spectre du courant d'onduleur contient dans le cas sain des harmoniques basses fréquences appartenant à la famille : $6kf_s$, ce qui vérifie bien les résultats théoriques obtenus au paragraphe 2.5.

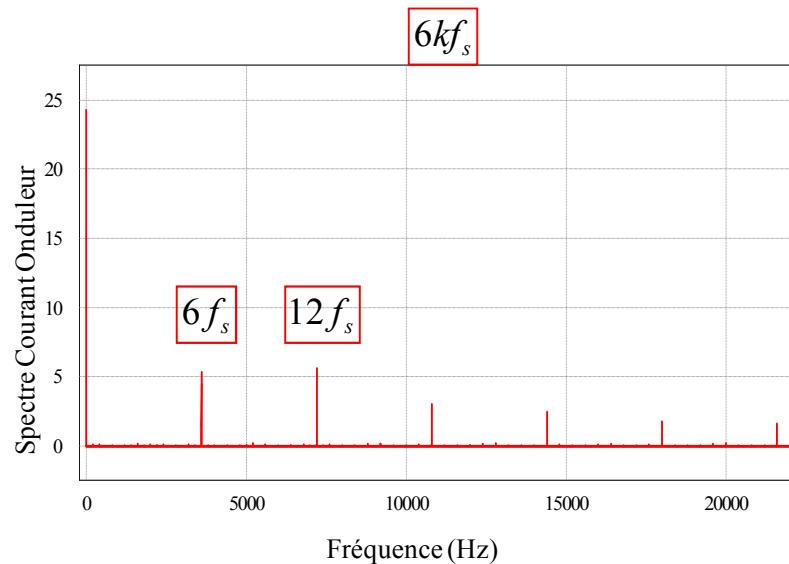


Figure 2-26 : Spectre du courant d'onduleur en cas sain

▪ Cas sain avec oscillation de vitesse

En présence d'une oscillation de vitesse, nous avons établi que le signal du courant d'onduleur sera modulé à la fréquence des oscillations de vitesse. Comme le montre la figure 2-27, ces modulations se traduisent bien par la présence d'harmoniques à $6kf_s \pm nf_{osc}$. Nous considérons que seuls les harmoniques avec $n < 1$ sont significatifs et nous ne retiendrons donc que la famille $6kf_s \pm f_{osc}$.

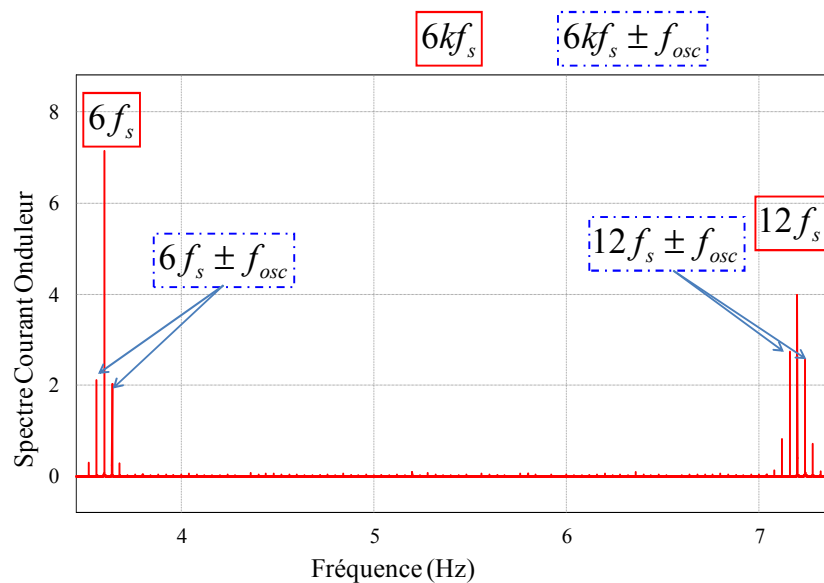


Figure 2-27 : Spectre du courant d'onduleur en présence d'une oscillation de vitesse

■ Cas sain avec décalage d'un aimant

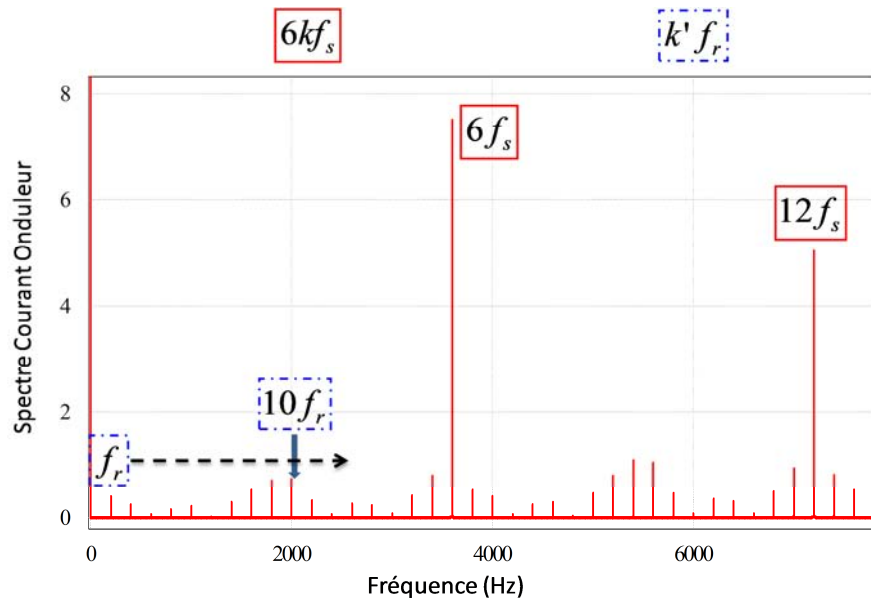


Figure 2-28 : Spectre du courant d'onduleur en présence d'un décalage d'aimant

L'un des aimants est maintenant décalé de 2° mécaniques par rapport à sa position initiale. Sur le spectre du courant d'onduleur (figure 2-28), nous observons bien l'apparition des harmoniques à $6kf_s$, ainsi qu'une deuxième famille à $k'f_r$.

■ Cas sain avec décalage d'un capteur

L'un des capteurs est maintenant décalé de 2° mécaniques par rapport à sa position initiale. Sur la figure 2-29, où est représenté le spectre du courant onduleur, nous remarquons que la famille $6kf_s$ est toujours présente et nous remarquons l'apparition de la famille $2k'f_s$.

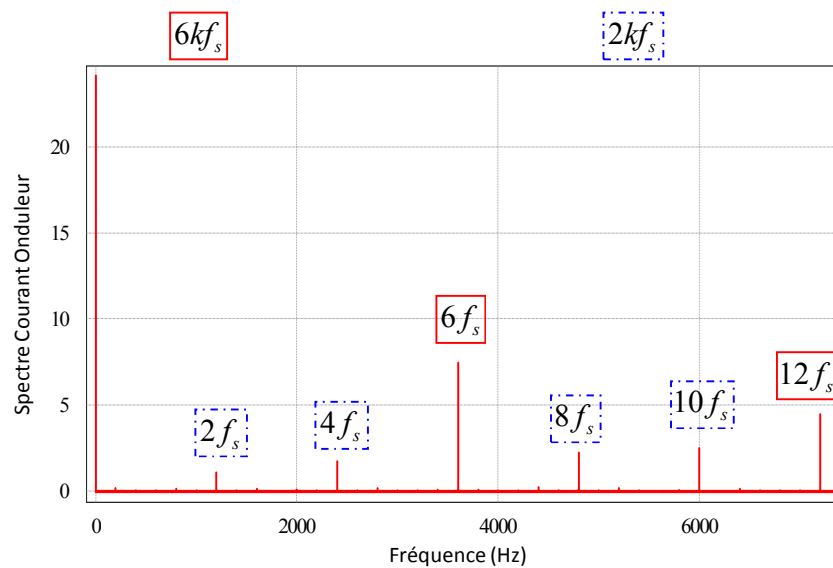


Figure 2-29 : Spectre du courant d'onduleur en présence d'un décalage de capteur

2.11.4 Conclusion

Les simulations réalisées avec le modèle de simulation numérique de l'équipement ont permis de valider l'ensemble des familles théoriquement prédites. Nous connaissons dorénavant, d'un point de vue théorique et pour le cas d'un équipement sans défaut mécanique, les familles fréquentielles des principaux signaux. Cette étape de capitalisation des connaissances est indispensable car elle permet d'acquérir des connaissances sur les comportements des signaux que nous allons exploiter pour mettre au point un indicateur de défaillance. Pour terminer cette base de connaissances, il nous reste cependant à valider, sur les signaux expérimentaux de l'équipement en régime sain, la présence de ces harmoniques.

2.12 Résultats expérimentaux issus de la campagne d'essai - Cas sain

Dans ce paragraphe, nous exploitons les données expérimentales issues des campagnes d'essais réalisées sur l'équipement pour valider les approches théoriques et en simulation précédemment développées. L'objectif est de vérifier si les harmoniques prédites sont bien présentes sur les données expérimentales mais également de contrôler si d'autres harmoniques présents en régime sain n'ont pas été oubliés. Nous prenons pour l'analyse, les signaux issus des capteurs sur une machine saine tournant à 12000 tr/min.

2.12.1 Observation de la vitesse de rotation mécanique

Comme nous l'avons évoqué précédemment, la vitesse de rotation de l'actionneur est une grandeur importante pour l'analyse puisque la présence d'oscillation de vitesse impacte fortement le contenu harmonique des autres grandeurs. La vitesse n'est pas directement mesurée sur l'équipement. Il est donc proposé de la reconstruire à partir des signaux issus des capteurs de position.

Les signaux issus des capteurs de position sont échantillonnés à la fréquence $F_e = 200$ kHz, ce qui représente 1000 points par tour mécanique à la vitesse 12 000 tr/min. A partir de ce signal, nous pouvons reconstituer la vitesse de l'actionneur en comptant le temps écoulé entre deux fronts successifs (la fréquence d'échantillonnage étant parfaitement connue). La distance angulaire mécanique entre 2 fronts est en effet de $\theta_f = \pi/3$. Le temps T_f écoulé entre deux fronts est mesuré en multipliant par T_e le nombre N_f d'échantillons récoltés entre les 2 fronts. Ainsi, $T_f = N_f \cdot T_e$. La pulsation de rotation mécanique est ensuite évaluée par l'équation (2-32).

$$\omega_{estim} = \frac{\pi/3}{T_f} \quad (2-32)$$

Notons que cette vitesse peut comporter une erreur de mesure. En effet, la précision de la mesure du temps entre deux fronts du signal du capteur de position, qui nous sert à calculer la vitesse, est liée à la fréquence d'échantillonnage. Dans le cas le plus défavorable, le temps T_f est estimé avec une erreur $\pm\Delta T$ égale à la période d'échantillonnage, soit à 200kHz une erreur temporelle maximale de $\pm\Delta T = \pm T_e = \pm 5\mu s$. Le temps théorique T_{f_th} mis pour parcourir une distance angulaire mécanique de $\pi/3$ est liée à la vitesse théorique ω_{th} par :

$$\omega_{th} = \frac{\pi/3}{T_{f_th}} \quad (2-33)$$

La vitesse estimée tenant compte de l'erreur de mesure temporelle s'exprime par :

$$\omega_{estim} = \frac{\pi/3}{T_{f_th} \pm \Delta T} \quad (2-34)$$

Ainsi, l'erreur de mesure maximale commise s'exprime par :

$$|\Delta\omega| = \omega_{th} - \omega_{estim} = \pi/3 \frac{\Delta T}{T_{f_th}(T_{f_th} + \Delta T)} \quad (2-35)$$

La figure 2-30 montre la variation de cette erreur en fonction des vitesses théoriques.

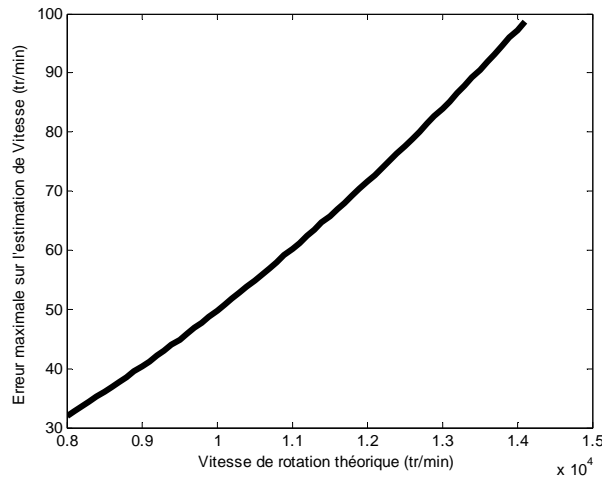


Figure 2-30 : Erreur maximale sur l'estimation de vitesse en fonction de la vitesse de rotation pour $F_e = 200$ kHz

La figure 2-31 illustre un exemple du signal de vitesse ainsi estimée, pour une vitesse de consigne de 12 000 tr/min. Comme nous pouvons le constater, la vitesse n'est pas rigoureusement constante. Les amplitudes des variations constatées sont supérieures aux erreurs qui ont pu être commises sur l'estimation de la vitesse, montrant que la vitesse comporte bien des oscillations en régime sain.

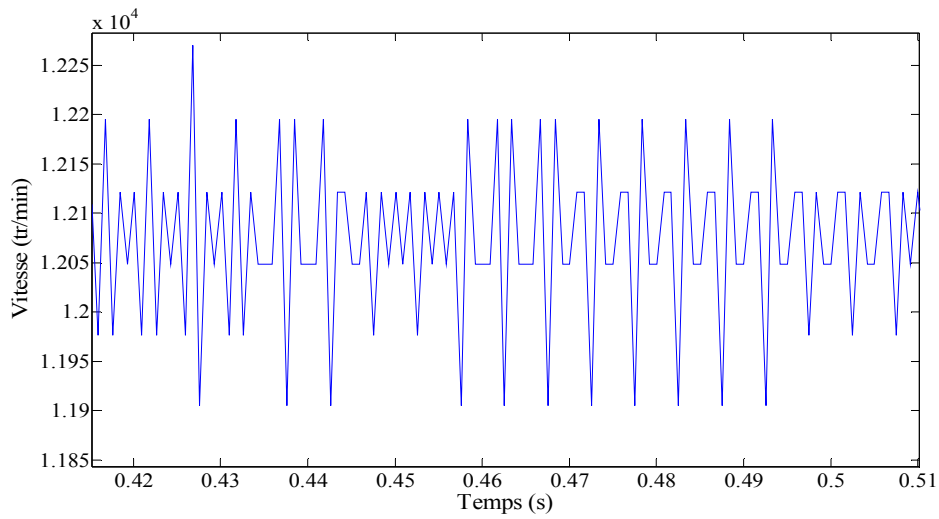


Figure 2-31 : Vitesse de rotation mécanique reconstituée à partir du signal du capteur de position

Si l'on évalue le spectre de la vitesse, nous constatons qu'il contient des harmoniques en cas sain. La figure 2-32 représente ce spectre et des harmoniques aux fréquences multiples de la fréquence de rotation sont visibles. Comme expliqué au paragraphe 2.6, l'apparition de ces harmoniques dans le spectre de vitesse est synonyme d'oscillation de vitesse. Les fréquences d'oscillations relevées sur la vitesse, à savoir $f_{osc_1} = f_r$, $f_{osc_2} = 2f_r$ et $f_{osc_3} = f_s$ vont donc entraîner des harmoniques de modulation à $(2k + 1)f_s \pm f_{osc_i}$ sur le signal position, à $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc_i}$ sur le signal courant statorique, et à $6kf_s \pm f_{osc_i}$ sur le signal courant onduleur.

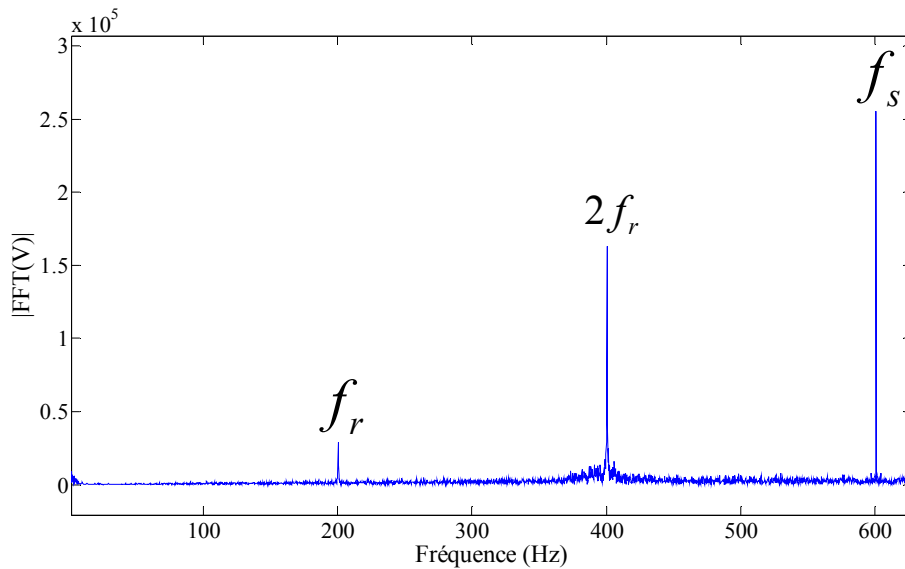


Figure 2-32 : Contenu fréquentiel de la vitesse de rotation – Cas sain

2.12.2 Etude du Signal expérimental issu du capteur de position

Rappel

	Sain	Sain +oscillation Vitesse	Sain +décalage aimant	Sain +décalage capteur	Sain oscillation vitesse décalage aimant +	Sain + oscillation vitesse+décalage capteur
Position	$(2k + 1)f_s$	$(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$	$(2k + 1)f_s$ $k'f_r$	$(2k + 1)f_s$	$(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$ $k'f_r$ $k'f_r \pm f_{osc}$	$(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$

D'après notre étude théorique et les simulations effectuées, les oscillations sur la vitesse entraînent l'apparition de la famille harmonique $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$ sur le signal du capteur de position. Le tableau 2-10 énumère, compte tenu des oscillations constatées expérimentalement sur la vitesse de rotation, l'ensemble des fréquences liées aux harmoniques de vitesse attendus dans le spectre du signal de position. Nous remarquons que les fréquences présentes à $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$ sont des multiples de f_r .

Familles harmoniques attendues		Harmoniques attendus dans le signal capteur de position (en multiple de f_r)		
		$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$
$(2k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$	$f_{osc} = f_r \rightarrow (2k + 1)f_s \pm f_r$	2,4	8,10	14,16
	$f_{osc} = 2f_r \rightarrow (2k + 1)f_s \pm 2f_r$	1,5	7,11	13,17
	$f_{osc} = f_s \rightarrow (2k + 1)f_s \pm f_s$	0,6	6,12	12,18
$(2k \pm 1)f_s$		3	9	15

Tableau 2-10 : Harmoniques attendus dans le spectre du signal position en présence d'une oscillation de vitesse

Rappelons, comme le montre le tableau 2-9, que s'il existe un décalage des aimants, les familles $k'f_r$ et $k'f_r \pm f_{osc}$, sont présentes dans le spectre de la position. Si l'on évalue ces fréquences (tableau 2-11), on remarque que les familles $k'f_r$ et $k'f_r \pm f_{osc}$, sont couvertes par la famille $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$. Il est donc difficile d'identifier à partir du spectre du signal de position si un décalage d'aimant est présent. Le décalage de capteur, comme nous l'avons déjà dit, ne rajoute quant à lui aucun harmonique additionnel.

Famille $k'f_r \pm f_{osc}$	Harmoniques attendus liés à la présence d'un décalage aimant (en multiple de f_r)				
	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$
$f_{osc} = f_r \rightarrow kf_r \pm f_r$	1	2	1,3	2,4	3,5
$f_{osc} = 2f_r \rightarrow kf_r \pm 2f_r$	2	1,3	4	1,5	2,6
$f_{osc} = f_s \rightarrow kf_r \pm f_s$	3	2,4	1,5	6	1,7

Tableau 2-11 : Harmoniques de la famille $k'f_r \pm f_{osc,i}$ attendus dans le cas d'un décalage d'aimants et d'une oscillation de vitesse

La figure 2-33 montre le spectre obtenu pour le signal position dans le cas d'une machine saine. Les familles fréquentielles attendues sont bien présentes.

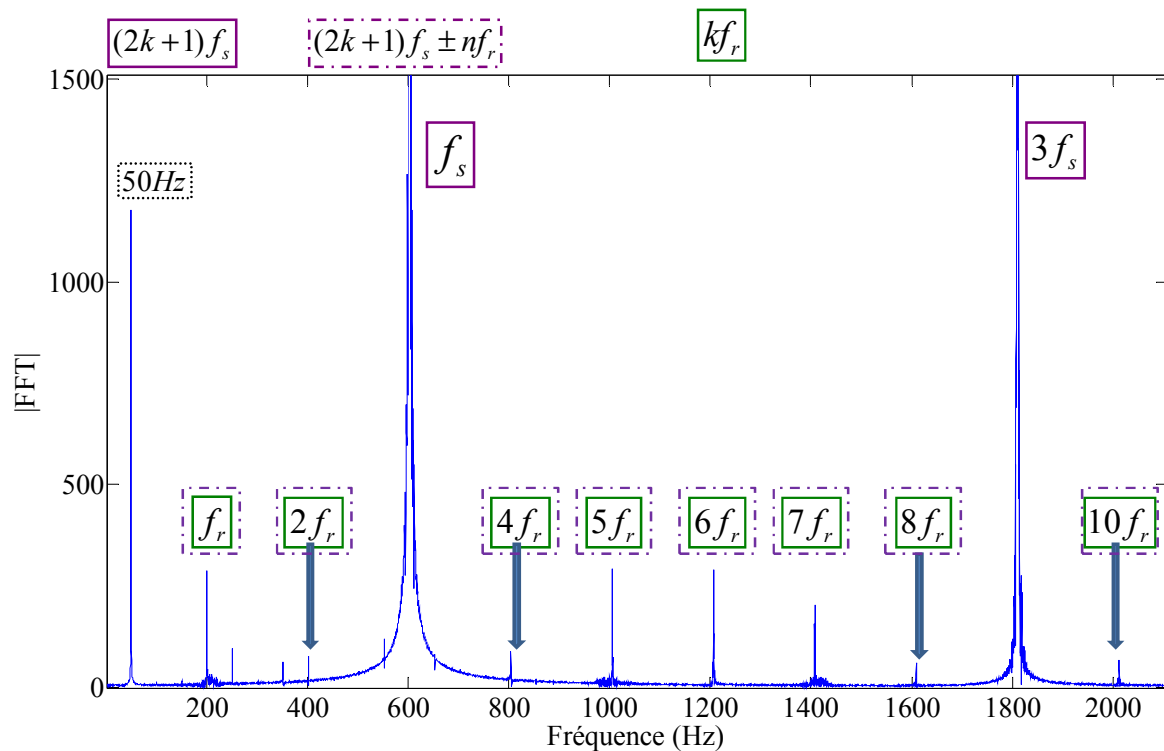


Figure 2-33 : Contenu fréquentiel du signal de position expérimental – Cas sain

2.12.3 Etude du signal courant statorique

Rappel

	Sain	Sain +oscillation Vitesse	Sain +décalage aimant	Sain +décalage capteur	Sain + oscillation vitesse + décalage aimant	Sain + oscillation vitesse+décalage capteur
Courant de phase	$(6k \pm 1)f_s$	$(6k \pm 1)f_s$ $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$	$(6k \pm 1)f_s$ $k'f_r$	$(6k \pm 1)f_s$ $(2k + 1)f_s$	$(6k \pm 1)f_s$ $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$ $k'f_r$ $k'f_r \pm f_{osc}$	$(6k \pm 1)f_s$ $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$ $(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$

Comme nous l'avons montré au paragraphe 2.6.2, le signal de courant statorique doit, compte tenu des harmoniques identifiés sur la vitesse, contenir tous les harmoniques de la famille $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc_i}$. Le tableau 2-12 récapitule l'ensemble des harmoniques de cette famille.

Famille $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$	Harmoniques attendus dans le signal courant de phase (multiple de f_r)		
	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$
$f_{osc} = f_r \rightarrow (6k \pm 1)f_s \pm f_r$	2,4	14,16,20,22	32,34,38,40
$f_{osc} = 2f_r \rightarrow (6k \pm 1)f_s \pm 2f_r$	1,5	13,17,19,23	31,35,37,41
$f_{osc} = f_s \rightarrow (6k \pm 1)f_s \pm f_s$	0,6	12,18,24	30,36,42

Tableau 2-12 : Harmoniques de la famille $(6k \pm 1)f_s \pm nf_{osc}$ attendus dans le spectre du courant de phase en présence d'une oscillation de vitesse

Si la machine présente un décalage d'aimant, les familles $k'f_r$ ou $k'f_r \pm f_{osc}$ peuvent apparaître. Comme nous l'avons vu précédemment, ces familles comportent tous les multiples de f_r (tableau 2-11).

Si la machine présente un décalage capteur, les familles $(2k + 1)f_s$ ou $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$ peuvent apparaître dans le spectre du courant statorique. Les fréquences mises en jeu sont rappelées dans le tableau 2-13.

Famille $(2k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$	Harmoniques attendus dans le signal capteur de position (en multiple de f_r)		
	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$
$f_{osc} = f_r \rightarrow (2k + 1)f_s \pm f_r$	2,4	8,10	14,16
$f_{osc} = 2f_r \rightarrow (2k + 1)f_s \pm 2f_r$	1,5	7,11	13,17
$f_{osc} = f_s \rightarrow (2k + 1)f_s \pm f_s$	0,6	6,12	12,18

Tableau 2-13 : Harmoniques de la famille $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$ attendus dans le spectre du signal position en présence d'un décalage capteur

La figure 2-34 montre le spectre obtenu pour le courant de phase. Les familles à $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc_i}$ sont bien présentes. Nous constatons l'apparition d'un harmonique à $3f_s$. Ce dernier n'appartient pas à la famille $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc_i}$ ni à la famille $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$. Il peut par contre appartenir à la famille $(2k + 1)f_s$ ou $k'f_r \pm f_{osc}$ et peut donc provenir d'un décalage d'aimant ou de capteur de position. Les harmoniques à 1400Hz et 2200Hz proviennent de la famille $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$ ou $k'f_r \pm f_{osc}$ (par exemple $3f_s \pm 2f_r$ ou $9f_r \pm 2f_r$).

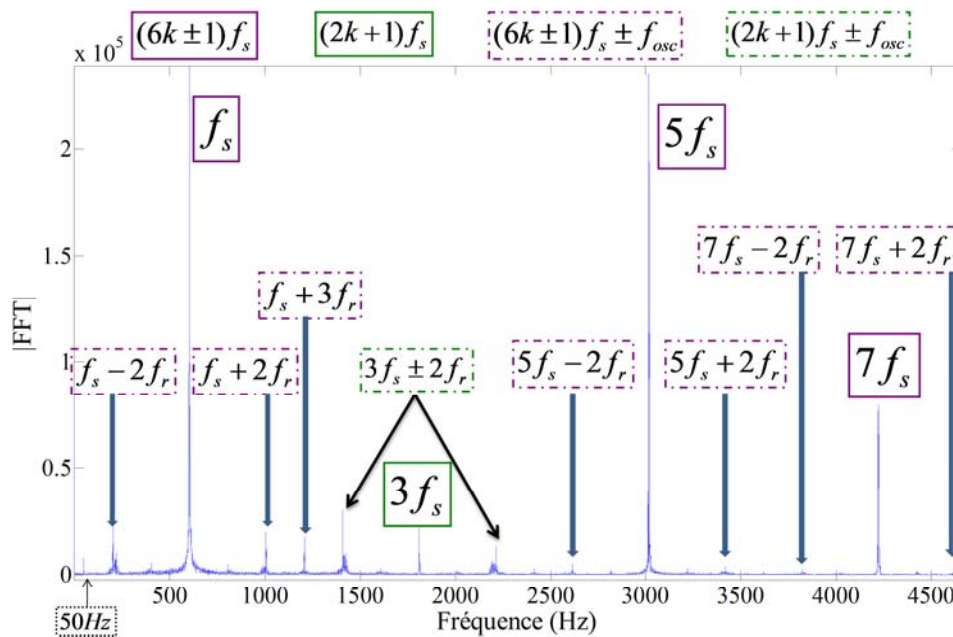


Figure 2-34 : Contenu fréquentiel du spectre de courant statorique expérimental – Cas sain

Remarque : Sur la figure 2-35, on peut voir une photographie des 3 capteurs de position de la machine utilisée lors de la campagne d'essai. On constate sur l'image la présence d'un décalage de l'un des capteurs de position (en rouge) qui peut expliquer les harmoniques constatés.



Figure 2-35 : Décalage d'un capteur de position

2.12.4 Etude du signal courant d'onduleur

Rappel

	Sain	Sain +oscillation Vitesse	Sain +décalage aimant	Sain +décalage capteur	Sain oscillation vitesse décalage aimant	Sain oscillation vitesse+décalage capteur
Courant d'onduleur	$6kf_s$	$6kf_s$ $6kf_s \pm f_{osc}$	$6kf_s$ $k'f_r$	$6kf_s$ $2k'f_s$	$6kf_s$ $6kf_s \pm f_{osc}$ $k'f_r$ $k'f_r \pm f_{osc}$	$6kf_s$ $6kf_s \pm f_{osc}$ $2k'f_s$ $2k'f_s \pm f_{osc}$

Comme nous l'avons montré au paragraphe 2.6.3, le signal de courant d'onduleur doit, compte tenu des harmoniques identifiés sur la vitesse, contenir tous les harmoniques de la famille $6kf_s \pm nf_{osc_i}$. Le tableau 2-14 récapitule l'ensemble des harmoniques de cette famille.

Famille $6kf_s \pm f_{osc}$	Harmoniques attendus dans le signal courant d'onduleur (multiple de f_r)		
	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$
$f_{osc} = f_r \rightarrow 6kf_s \pm f_r$	1	17,19	35,37
$f_{osc} = 2f_r \rightarrow 6kf_s \pm 2f_r$	2	16,20	34,38
$f_{osc} = f_s \rightarrow 6kf_s \pm f_s$	3	15,21	33,39

Tableau 2-14 : Harmoniques de la famille $6kf_s \pm nf_{osc}$ attendus dans le spectre du courant d'onduleur en présence d'une oscillation de vitesse

Si la machine présente un décalage d'aimant, les familles $k'f_r$ ou $k'f_r \pm f_{osc}$ peuvent apparaître. Comme nous l'avons vu précédemment, ces familles comportent tous les multiples de f_r (tableau 2-11).

Si la machine présente un décalage capteur, les familles $2kf_s$ ou $2kf_s \pm f_{osc}$ peuvent apparaître dans le spectre du courant statorique. Les fréquences mises en jeu sont rappelées dans le tableau 2-15.

Famille $2kf_s \pm f_{osc}$	Harmoniques attendus dans le signal courant d'onduleur (en multiple de f_r)		
	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$
$f_{osc} = f_r \rightarrow 2kf_s \pm f_r$	1	1,3	3,5
$f_{osc} = 2f_r \rightarrow 2kf_s \pm 2f_r$	2	0,4	2,6
$f_{osc} = f_s \rightarrow 2kf_s \pm f_s$	3	1,5	1,7

Tableau 2-15 : Harmoniques de la famille $2kf_s \pm f_{osc}$ attendus dans le spectre du signal courant d'onduleur en présence d'un décalage capteur

La figure 2-36 montre le spectre obtenu pour le courant d'onduleur. Les familles à $6kf_s \pm f_{osc_i}$ sont bien présentes. Nous remarquons aussi la présence des harmoniques $2f_s \pm f_{osc_i}$, qui peuvent appartenir à la famille $k'f_r$ ou $2kf_s \pm f_{osc_i}$. Ils peuvent donc provenir d'un décalage d'aimant ou de capteur de position.

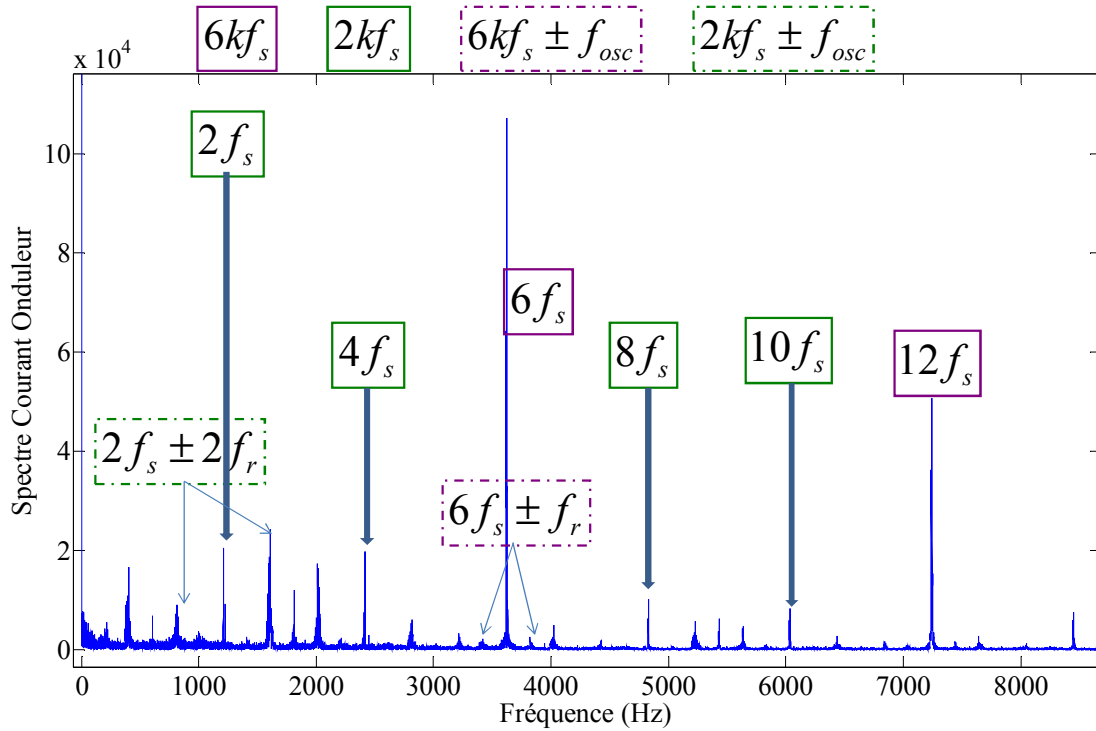


Figure 2-36 : Contenu fréquentiel du spectre de courant d'onduleur expérimental – Cas sain

2.12.5 Harmoniques supplémentaires liés à l'asynchronisme

Concernant l'étude théorique, nous avons, dans tout ce qui précède, négligé l'effet de la MLI. Ceci avait pour objectif, d'une part, de simplifier les calculs des contenus harmoniques des signaux, et d'autre part, de se focaliser principalement sur les phénomènes basses fréquences. En réalité, la modulation MLI fait apparaître des harmoniques hautes fréquences dans le courant statorique aux fréquences : $f_{dec} \pm (6k \pm 1)f_s$ où f_{dec} est la fréquence de découpage de la MLI, fixée à 20 kHz.

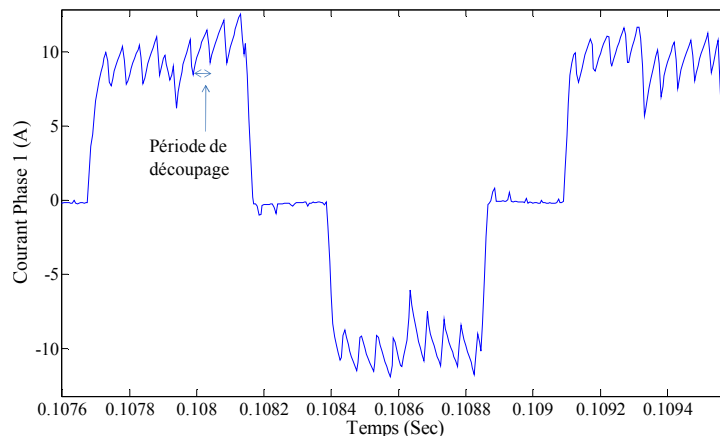


Figure 2-37 : Courant statorique dans une phase

La figure 2-37 représente l'évolution du courant statorique dans l'une des phases. Nous remarquons que les motifs liés au découpage ne sont pas rigoureusement les mêmes pour tous les plateaux de courant. En particulier, l'évolution des commandes de l'onduleur peut avoir lieu même si la période de découpage n'est pas entièrement terminée. La durée d'une période de découpage est toujours fixe, mais ce sont les capteurs de position, liés à la fréquence de rotation mécanique, qui imposent les instants de basculement. Ainsi, si le rapport entre période électrique et période de découpage n'est pas fixe, il y a création d'harmoniques basses fréquences que nous nommons harmoniques d'asynchronisme.

La fréquence d'asynchronisme est le reste de la division de la fréquence de découpage par la fréquence électrique :

$$f_{asy} = \text{mod} \left(\frac{f_{dec}}{f_s} \right) \quad (2-36)$$

Le tableau 2-16 montre la fréquence d'asynchronisme pour les différentes vitesses étudiées.

Vitesse (tr/min)	8000	10000	12000	14100
f_{asy} (Hz)	0	0	200	260

Tableau 2-16 : Fréquence d'asynchronisme pour les différentes vitesses

Pour les vitesses 8000 et 10000 tr/min, la fréquence de découpage est un multiple entier de la fréquence électrique, donc la fréquence d'asynchronisme est nulle. Pour 12000 tr/min, la fréquence d'asynchronisme est égale à la fréquence mécanique. Puisque les multiples de la fréquence de rotation apparaissent déjà dans le signal du courant statorique (voir paragraphe 2.8.1), l'influence de l'asynchronisme n'apparaît donc pas dans ce cas sur les spectres du courant. Pour 14100 tr/min, la fréquence d'asynchronisme est de 260 Hz. La figure 2-38 montre le spectre de courant de phase pour cette vitesse.

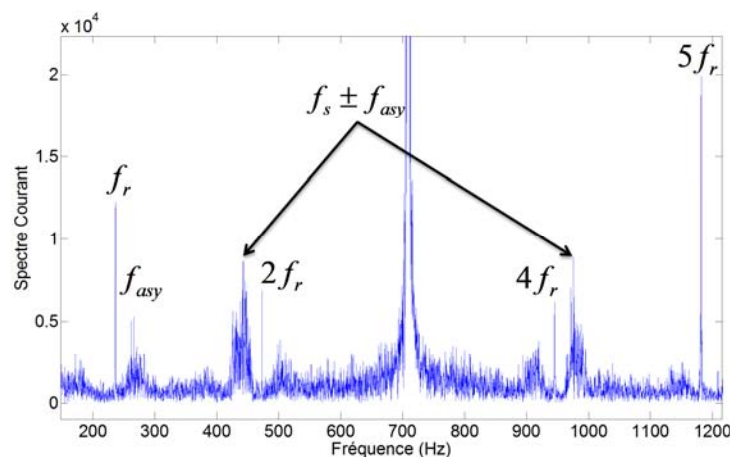


Figure 2-38 : Présence d'harmonique d'asynchronisme à la vitesse 14100 tr/min

L'effet d'asynchronisme apparaît donc bien sur les fréquences de type : $kf_s \pm f_{asy}$

L'effet de l'asynchronisme apparaît bien évidemment sur le spectre du courant d'onduleur, puisque les harmoniques du courant d'onduleur et du courant de phase sont liés par l'équation (2-9). La figure 2-39 montre la présence des harmoniques aux fréquences liées à l'asynchronisme dans le spectre du courant d'onduleur à 14100 tr/min.

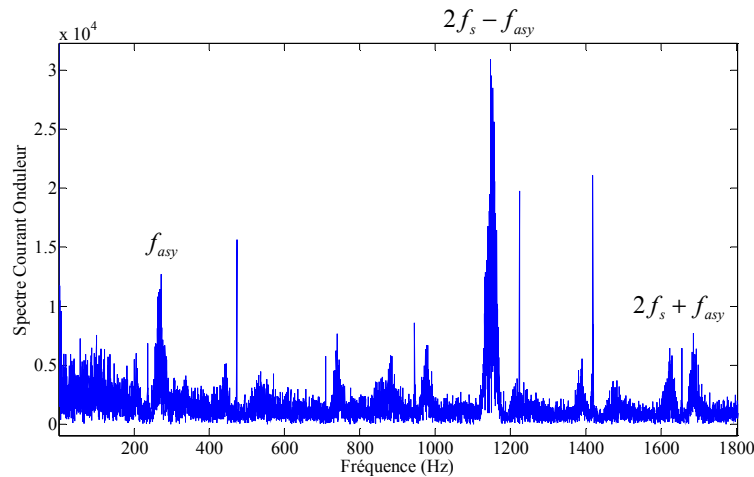


Figure 2-39 : Présence d'harmonique d'asynchronisme à la vitesse 14100 tr/min sur le courant en entrée de l'onduleur

2.13 Conclusion

Dans ce second chapitre, nous avons étudié le contenu fréquentiel de différentes grandeurs mesurées ou reconstituées sur l'équipement à surveiller. Il s'agissait, d'un point de vue méthodologique, de capitaliser des connaissances sur le comportement de l'équipement en régime sain, plusieurs familles fréquentielles ont ainsi pu être identifiées. L'approche théorique et par simulation a non seulement permis de mettre en évidence la présence de certains harmoniques mais surtout de faire le lien avec les phénomènes réels leur donnant naissance. Les deux campagnes d'essais réalisées en régime sain ont fourni une grande quantité de données expérimentales permettant de valider les contenus harmoniques prédits, en tenant compte des imperfections de la machines et de son mode d'alimentation. L'ensemble de ces familles fréquentielles identifiées est rappelé dans le tableau 2-17.

L'identification de ces informations est indispensable dans la mise au point d'un dispositif de détection / diagnostic. Nous remarquons en effet que les contenus harmoniques des signaux étudiés sont riches, même en cas sain. Cette complexité rend leur exploitation pour la détection difficile car il faut pouvoir extraire des signaux défaillants des signatures suffisamment discriminantes par rapport au cas sain pour assurer une détection fiable et robuste. Les connaissances capitalisées permettront, au moment de la conception des algorithmes, de cibler plus efficacement la détection sur les phénomènes liés à la dégradation ou au défaut que l'on cherche à identifier.

	Sain	Sain +oscillation Vitesse	Sain +décalage aimant	Sain +décalage capteur	Sain oscillation vitesse décalage aimant	Sain + oscillation vitesse+décalage capteur
Position	$(2k + 1)f_s$	$(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s$ $\pm f_{osc}$	$(2k + 1)f_s$ $k'f_r$	$(2k + 1)f_s$	$(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s$ $\pm f_{osc}$ $k'f_r$ $k'f_r \pm f_{osc}$	$(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$
Courant de phase	$(6k \pm 1)f_s$	$(6k \pm 1)f_s$ $(6k \pm 1)f_s$ $\pm f_{osc}$	$(6k \pm 1)f_s$ $k'f_r$	$(6k \pm 1)f_s$ $(2k + 1)f_s$	$(6k \pm 1)f_s$ $(6k \pm 1)f_s$ $\pm f_{osc}$ $k'f_r$ $k'f_r \pm f_{osc}$	$(6k \pm 1)f_s$ $(6k \pm 1)f_s \pm f_{osc}$ $(2k + 1)f_s$ $(2k + 1)f_s \pm f_{osc}$
Courant d'onduleur	$6kf_s$	$6kf_s$ $6kf_s \pm f_{osc}$	$6kf_s$ $k'f_r$	$6kf_s$ $2k'f_s$	$6kf_s$ $6kf_s \pm f_{osc}$ $k'f_r$ $k'f_r \pm f_{osc}$	$6kf_s$ $6kf_s \pm f_{osc}$ $2k'f_s$ $2k'f_s \pm f_{osc}$

Tableau 2-17 : Récapitulatif des différentes familles fréquentielle identifiées sur les grandeurs de l'équipement

Pour ce faire, la suite du travail sera consacrée à réaliser une comparaison entre spectres expérimentaux sains et défaillants, pour les signaux vitesse, position, courant de phase et courant d'onduleur. Même si certaines connaissances a priori peuvent nous permettre une projection théorique sur certains harmoniques attendus (harmoniques supplémentaires sur la vitesse en présence de défauts, apparition sur certaines grandeurs des fréquences caractéristiques des défauts de roulements...), l'exploitation des informations issues des campagnes d'essais en régime défaillant s'avère être un point d'entrée indispensable compte tenu de la complexité constatée sur les signaux expérimentaux. Notre objectif sera donc d'observer et d'identifier, sur les différentes grandeurs, les harmoniques les plus sensibles à la présence des défauts de roulements. Forts de l'étude théorique menée dans ce chapitre, où nous avons constaté que les phénomènes d'oscillation de vitesse étaient au cœur des phénomènes générateurs d'harmoniques, nous concentrerons nos premières analyses comparatives sain-défaillant sur les spectres de la vitesse.

Chapitre 3 : Recherche des signatures fréquentielles caractérisant les défauts de roulements

3.1 Introduction

Le chapitre 2 nous a permis de développer une base de connaissances importante sur les contenus harmoniques de différents signaux issus d'un équipement sain, en présence d'oscillation de vitesse, et d'imperfections de construction sur les capteurs et les aimants.

Après avoir étudié le contenu théorique fréquentiel de ces différents signaux, nous avons désormais une idée *a priori* de leurs contenus spectraux. Dans le paragraphe 2.12, nous avons étudié et montré le contenu spectral réel de ces signaux en mode sain. Dans ce chapitre, nous en étudions le contenu spectral en mode défaillant.

Dans une première partie, nous comparons un spectre sain et un spectre défaillant pour chaque signal étudié (vitesse, position, courant d'onduleur et courant statorique). Cette comparaison nous permettra de choisir la famille de fréquences sensible au défaut, et donc de cibler le calcul des indicateurs sur ces fréquences. L'étude théorique du chapitre 2 montre que l'apparition d'un harmonique dans le spectre de vitesse se traduit par des harmoniques modulés dans les spectres de position, du courant statorique et du courant onduleur. En se basant sur cette étude, le spectre de vitesse sera évalué pour montrer les harmoniques présentant des niveaux d'énergie distinguables en régime défaillant, puis nous étudions la propagation de ces harmoniques dans les spectres des différents signaux étudiés.

La deuxième partie est consacrée au calcul d'indicateurs énergétiques. A partir de l'étude des spectres défaillants, nous sélectionnons certaines fréquences sensibles à la présence du défaut pour chaque signal étudié, puis nous calculons périodiquement une forme d'énergie autour de ces fréquences, jusqu'à l'arrêt de la machine. La méthode de calcul de l'indicateur sera présentée, puis différents résultats seront montrés à la fin de cette partie.

Dans une troisième partie, nous allons définir certains critères de comparaison, afin d'étudier et classer les résultats obtenus. En effet, vu la vaste variation des paramètres du calcul de l'indicateur (nombre de points pour calculer l'indicateur, fréquences sélectionnées, vitesse de rotation, signal étudié (vitesse, position, courant, ...)), nous avons créé certains critères pour comparer et classer les résultats obtenus. Ces critères étudient la robustesse, la reproductibilité et la bonne détection de l'indicateur pour les différents paramètres.

Finalement, nous étudions certaines signatures qui apparaissent dans la première campagne d'essai, et qui ne sont pas liés au défaut mécanique surveillé. L'indicateur énergétique sera également construit pour ces signatures.

3.2 Présentation des campagnes d'essais en mode de dégradation

Déterminer les conditions de réalisations optimales d'essais de vieillissement ou de dégradation n'est pas trivial. Idéalement, la démarche consisterait à appliquer à un équipement sain les mêmes conditions de fonctionnement et les mêmes sollicitations que celle auxquelles il serait soumis au sein du système qu'il intègre. La surveillance du vieillissement et d'éventuelles dégradations pourrait alors être réalisée pour établir, au cours de la durée de vie de l'équipement, les signes d'évolution de son état de santé. Bien évidemment, cette démarche est très souvent inapplicable compte tenu des contraintes de durée imposées par ce genre de protocole. Partir d'un équipement sain et le conduire dans un état de défaillance nécessiterait de trop nombreuses heures d'essais et des quantités d'informations à analyser bien trop importantes (la durée de vie d'un fan est de l'ordre de 20 000 heures dans les conditions normales).

La plupart du temps, on opte pour des essais conduisant à une accélération du vieillissement. Dans ces cas, l'objectif est de choisir des conditions de fonctionnement plus contraignantes pour l'équipement que les contraintes nominales, ou de dégrader artificiellement certains de ses composants pour conduire plus rapidement vers les états dégradés. Les difficultés liées à ces protocoles résident dans le choix de ces contraintes ou de ces dégradations artificielles. Elles doivent permettre d'impacter plus sévèrement que la normale sur l'état de santé de l'équipement, tout en restant suffisamment représentative des dégradations naturelles que subit l'équipement sur avion.

La figure 3-1 montre l'exemple d'un roulement sain, et d'un roulement défaillant avec les bagues interne et externe percées par électro-érosion.

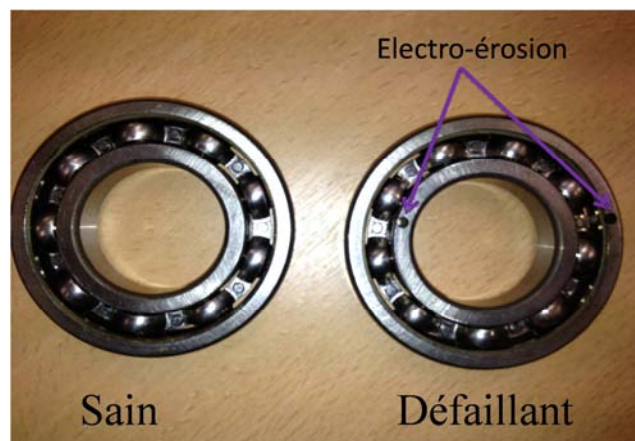


Figure 3-1: Roulement sain et roulement défaillant

Forts de l'expérience du service mécanique de TECHNOFAN et de plusieurs campagnes vibratoires réalisées sur leurs équipements, un protocole de vieillissement accéléré nous a été proposé par notre partenaire. Il s'agit de brûler les graisses du roulement avant à 200° pendant 60 heures et de casser la cage en 2 points.

Ce type de dégradation pour un roulement est intéressant car il permet à la machine qui en est équipée de fonctionner à un niveau vibratoire très proche du niveau obtenu en régime sain, seulement pendant quelques heures de fonctionnement avant que les premiers signes de défaillances ne se manifestent [104]. Les détériorations réalisées permettent d'assurer par la suite une dégradation rapide de l'état du roulement.

Deux campagnes d'essais longue durée ont été réalisées avec des roulements ayant suivi le même protocole de dégradation.

☐ Campagne d'essai N°1

La première campagne d'essais s'est déroulée en juin/juillet 2010. Durant cette campagne, nous avons mesuré les signaux suivants :

- Courant de phase numéro 1, 2 et 3 : les courants de phase sont utilisés pour calculer les courants de Concordia,
- Capteur de position numéro 2 : le capteur de position est utilisé pour calculer une estimation de la vitesse de rotation,
- Courant de bus continu et courant de capacité de filtrage: les courants de bus continu et de capacité sont utilisés pour calculer le courant d'onduleur.

Le tableau 3-1 présente le nombre d'enregistrements réalisés durant cette première campagne dans différentes conditions de fonctionnement, sain ou défaillant et pour différentes vitesses. Chaque enregistrement correspond à 5s de signal échantillonné à 200 kHz.

Vitesse (tr/min)	8000	10000	12000	14100	TOTAL
SAIN	15	15	15	39	84
DEFAUT	106	108	102	171	487
TOTAL	121	123	117	210	571

Tableau 3-1 : Nombres d'enregistrements réalisés durant la campagne 1

☐ Campagne d'essai N°2 :

La deuxième campagne d'essais s'est déroulée en décembre/janvier 2011/2012. Durant cette campagne, nous avons mesuré les signaux suivants :

- Courant de phase numéro 1 et 2 : les courants de phase sont utilisés pour calculer le courant de phase 3 et les courants de Concordia,
- Capteur de position numéro 1, 2 et 3 : le nombre de signaux en provenance des trois capteurs de position a été augmenté pour obtenir une meilleure estimation de la vitesse,
- Courant de bus continu et courant de capacité : les courants de bus continu et de capacité sont utilisés pour calculer le courant d'onduleur.

Le tableau 3-2 présente la quantité de données enregistrées durant cette campagne. Notant qu'un système temps réel ne pourra pas enregistrer cette quantité de données, dans une première partie nous allons montrer les spectres obtenus en offline, avec la meilleure

précision possible (fréquence d'échantillonnage importante, donc quantité de données importante), puis le calcul de l'indicateur sera dirigé vers une application temps réel.

Vitesse (tr/min)	8000	10 000	12 000	14 100	TOTAL
SAIN	40	40	40	40	160
DEFAUT	168	165	161	408	902
TOTAL	208	205	201	448	1062

Tableau 3-2 : Nombre d'enregistrements réalisés durant la campagne 2

Nous montrons sur la figure 3-2 une comparaison temporelle entre un courant statorique sain, et un autre défaillant pour une période mécanique à la vitesse 12 000 tr/min. il est clair sur cette figure qu'il est impossible de distinguer entre les deux cas en étudiant les signaux temporels. Nous allons donc dans la suite étudier les spectres des différents signaux.

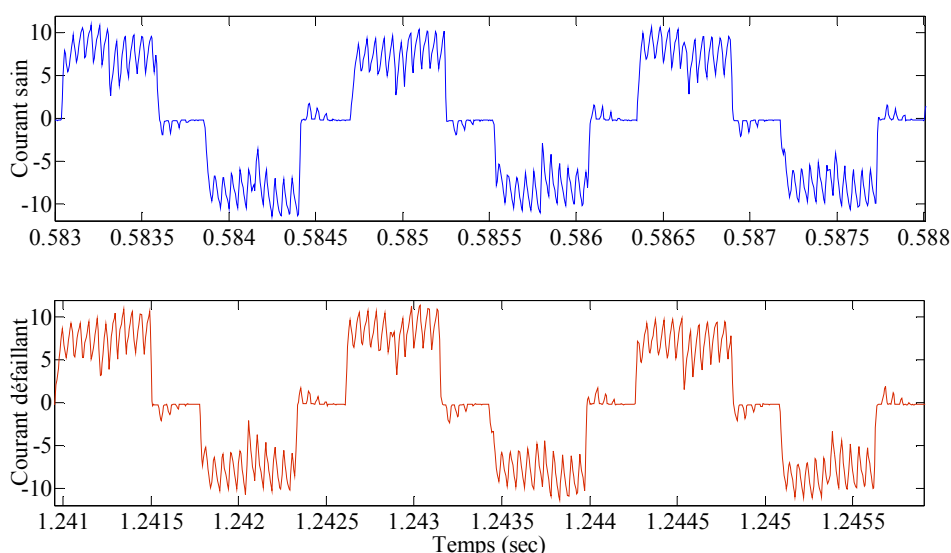


Figure 3-2 : Comparaison courant sain et courant défaillant sur une période mécanique

Rappelons également que parallèlement à toutes ces grandeurs, l'équipement est également instrumenté par un banc de mesures vibratoires. Un indicateur vibratoire est construit à partir du système d'acquisition de vibrations de TECHNOFAN. Il réalise une FFT du signal issu d'un capteur vibratoire placé sur le palier arrière et calcule une valeur RMS de ce signal dans une bande fréquentielle de 1 à 19 kHz. La figure 3-3 montre, pour la vitesse 12 000 tr/min, un exemple de l'indicateur vibratoire obtenu pour les campagnes N°1 (idem pour la figure 3-4 pour la campagne N°2). L'ensemble des résultats obtenus pour les autres vitesses pour les 2 campagnes peut être consulté en Annexe B. Il apparaît dans ces mesures, que les signatures de défauts ne sont pas exactement les mêmes, ni dans les amplitudes de l'indicateur, ni dans les dates où surviennent les variations de cet indicateur. Cette constatation souligne la difficulté de conception d'un algorithme de diagnostic robuste.

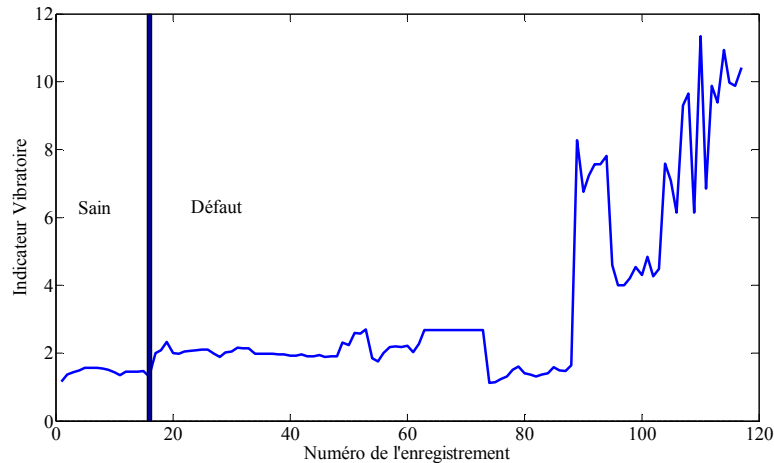


Figure 3-3 : Indicateur vibratoire à 12 000 tr/min (Campagne1)

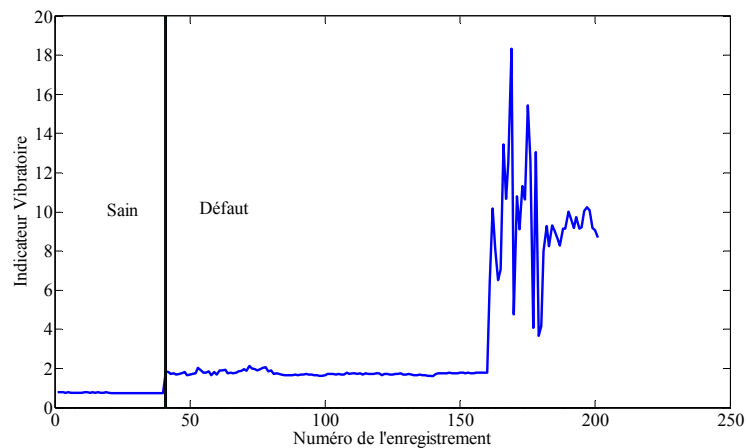


Figure 3-4 : Indicateur vibratoire à 12 000 tr/min (Campagne2)

3.3 Etude des spectres : Comparaison entre enregistrements sains et défaillants

Dans ce paragraphe, nous menons une comparaison entre des enregistrements sains et défaillants de la première campagne d'essai (mêmes conclusions en utilisant la campagne N°2). A travers la comparaison des spectres des différents signaux prélevés, l'objectif est de faire apparaître les signatures liées à l'apparition de la dégradation des roulements.

Les connaissances acquises lors des études menées en régime sain nous permettront de mettre en avant les harmoniques spécifiquement liées au défaut surveillé. Les résultats du chapitre précédent ont notamment montré l'importance des harmoniques présents sur la vitesse de rotation, qui se propagent sur toutes les autres grandeurs. Les mécanismes de compositions fréquentielles mis en évidence pourront être réutilisés pour prédire les familles fréquentielles liés à la dégradation sur les différentes grandeurs (position et courants).

Nous montrons dans le tableau 3-3 l'inventaire des familles fréquentielles pour les différentes vitesses de fonctionnement. Ces fréquences seront utilisées par la suite dans les spectres des différents signaux étudiés (vitesse, position, courant statorique et courant onduleur).

	8000 tr/min	10000 tr/min	12000 tr/min	14100 tr/min
f_{cage}	51	64	77	90
f_r	133	167	200	235
$f_r - 2f_{cage}$	31	38	46	54
f_s	400	500	600	705
$f_s - f_{cage}$	349	436	523	615
$f_s + f_{cage}$	451	564	677	795
$f_s - f_r + 2f_{cage}$	369	462	554	651
$f_s + f_r - 2f_{cage}$	431	538	646	759
$f_s - f_r$	267	333	400	470
$f_s + f_r$	533	667	800	940
$6f_s$	2400	3000	3600	4230
$6f_s - f_{cage}$	2349	2936	3523	4140
$6f_s + f_{cage}$	2451	3064	3677	4320
$6f_s - f_r + 2f_{cage}$	2369	2962	3554	4176
$6f_s + f_r - 2f_{cage}$	2431	3038	3646	4284
$6f_s - f_r$	2267	2833	3400	3995
$6f_s + f_r$	2533	3167	3800	4465

Tableau 3-3 : inventaire des familles fréquentielles pour différentes vitesses de fonctionnement

3.3.1 Etude du signal vitesse

La figure 3-5 représente le spectre du signal vitesse reconstitué à partir du signal position pour la campagne 1, à 12 000 tr/min. Sur cette figure, deux enregistrements sont superposés, un en cas sain et un en cas défaillant. L'enregistrement défaillant présenté est issu des mesures de fin de campagne, quand des vibrations mesurées mettent en évidence un niveau de dégradation du roulement au-delà d'un seuil considéré comme anormalement élevé par les mécaniciens de Technofan.

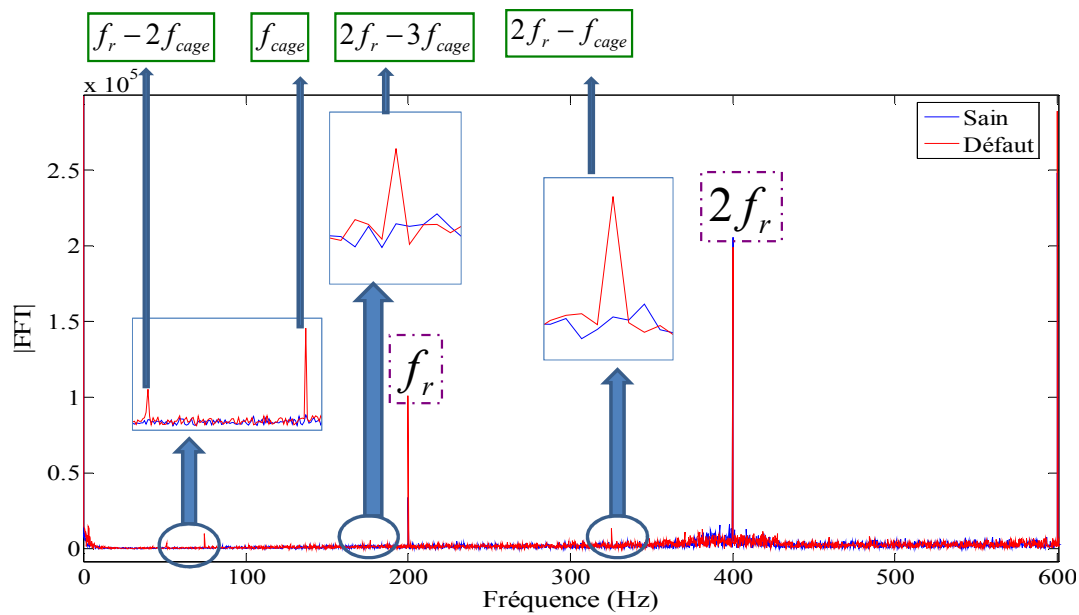


Figure 3-5 : Contenu fréquentiel du spectre vitesse (Campagne1) – Cas sain et défaillant à la vitesse 12 000 tr/min

Comme nous l'avons vu précédemment, la vitesse comporte des harmoniques aux fréquences f_r et $2f_r$ pour le cas sain. Nous retrouvons ces harmoniques en cas défaillant sur la vitesse mais elles semblent comporter, à la fréquence f_r , des amplitudes plus importantes que dans le cas sain.

De plus, en cas défaillant, de nouvelles raies apparaissent sur le spectre de la vitesse. Nous relevons principalement des harmoniques à 50Hz, 75 Hz, 175 Hz et 325 Hz qui n'existent pas en cas sain. L'origine de ces harmoniques est particulièrement intéressante puisqu'elle est liée à la fréquence caractéristique de cage. En effet, compte tenu des formules établissant les fréquences caractéristiques liées aux défaillances des roulements (1-1) pour la vitesse 12 000 tr/min, la fréquence caractéristique théorique de la cage est $f_{cage} = 77 \text{ Hz}$. Pour l'enregistrement présenté, compte tenu de l'imprécision de la régulation de la vitesse de rotation mécanique, la fréquence de cage est dans notre cas d'environ $f_{cage} = 75 \text{ Hz}$, fréquence qui correspond bien à une des raies observées sur le spectre de la vitesse. La fréquence de 50 Hz présente également un lien avec la fréquence de cage par la loi $f_r - 2f_{cage}$. La fréquence de 175Hz est liée à $2f_r - 3f_{cage}$, celle de 325Hz à $2f_r - f_{cage}$.

Ces observations sont bien évidemment à relier avec la dégradation de la cage du roulement opérée lors de sa préparation, puisque, rappelons-le, la cage a été brisée en 2 points. L'effet de l'échauffement des graisses est plus difficilement identifiable puisque c'est un défaut de type généralisé, qui ne peut être directement reliée à une fréquence caractéristique de l'un des éléments du roulement. D'autres observations réalisées sur le spectre de la vitesse pour les autres vitesses de rotation confirment la présence de ces familles harmoniques en cas défaillant.

Ainsi, nous pouvons considérer que la présence d'un défaut de roulements peut entraîner dans le spectre de la vitesse, la présence d'harmoniques répondant à la famille généralisée $kf_r \pm nf_{cage}$. Pour $n = 0$, nous retrouvons la famille des fréquence existant en régime sain et en régime défaillant (f_r et $2f_r$). Pour $n \neq 0$, nous obtenons la famille des fréquences qui sont propres au régime défaillant. Le tableau 3-4 regroupe l'ensemble de ces familles harmoniques pour la vitesse de 12 000 tr/min.

Famille généralisée $kf_r \pm nf_{cage}$	Harmoniques présents dans le signal vitesse (pour 12 000 tr/min)
Existent en régime sain et en régime défaillant	$f_r = 200\text{Hz}$
	$2f_r = 400\text{Hz}$
Propres au régime défaillant	$f_{cage} = 75\text{ Hz}$
	$f_r - 2f_{cage} = 50\text{Hz}$
	$2f_r - 3f_{cage} = 175\text{ Hz}$
	$2f_r - f_{cage} = 325\text{Hz}$

Tableau 3-4 : Récapitulatif des harmoniques présents dans le spectre de la vitesse en régime défaillant à la vitesse 12 000 tr/min

Pour les autres essais réalisés pour des vitesses différentes, des phénomènes similaires sont observables. La figure 3-6 montre le contenu fréquentiel du spectre de vitesse pour un enregistrement sain et un autre défaillant à la vitesse 8000 tr/min, (idem pour la figure 3-7 à la vitesse 10 000 tr/min et pour la figure 3-8 à 14 100 tr/min).

Un récapitulatif des harmoniques présents dans le spectre de la vitesse en régime défaillant est fourni dans le tableau 3-5 pour les différentes vitesses. La notation '+' correspond à la présence de l'harmonique considéré et la notation '-' à un harmonique non présent. Même s'il est présent pour toutes les vitesses, nous n'incluons pas l'harmonique à $2f_r$ car son amplitude ne varie pas de manière significative entre les enregistrements sains et défaillants. Nous remarquons dans ce tableau que toutes les fréquences identifiées ne sont pas systématiquement présentes. Seules les fréquences f_{cage} , $f_r - 2f_{cage}$ et f_r sont communes pour l'ensemble des vitesses considérées.

3.3 Etude des spectres : Comparaison entre enregistrements sains et défaillants

Vitesse	f_{cage}	$f_r - 2f_{cage}$	f_r	$2f_r - f_{cage}$	$2f_r - 3f_{cage}$	$f_r + 2f_{cage}$
8000	+	+	+	-	-	-
10000	+	+	+	-	-	-
12000	+	+	+	+	+	-
14100	+	+	+	+	+	+

Tableau 3-5 : Récapitulatif des harmoniques présents dans le spectre de la vitesse en régime défaillant pour les différentes vitesses

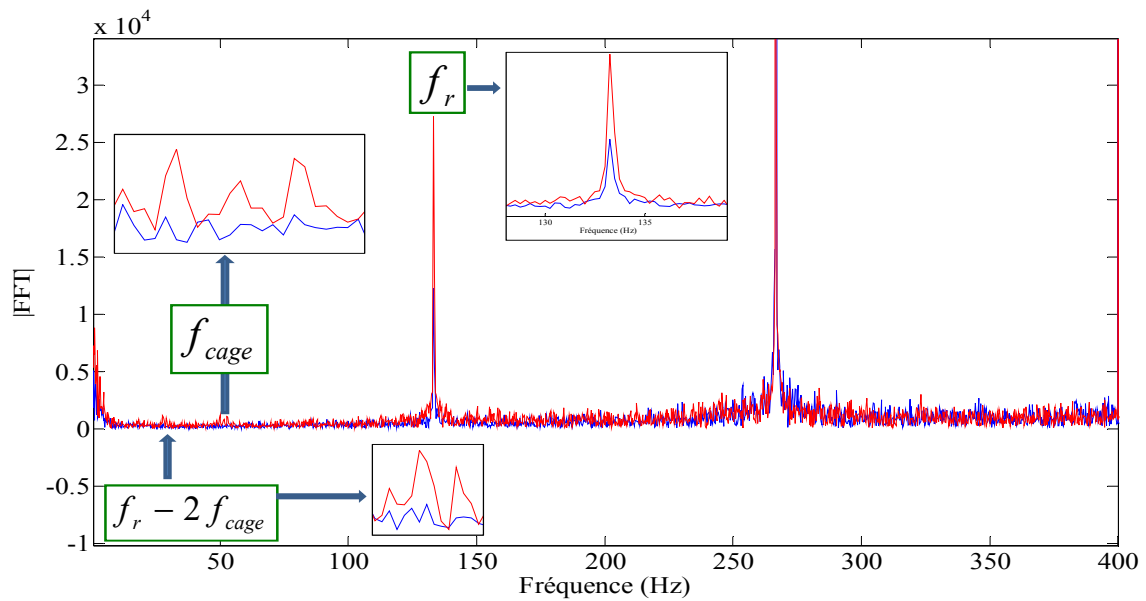


Figure 3-6 : Contenu fréquentiel du spectre de vitesse – Cas sain (bleu) et défaillant (rouge) à 8000 tr/min

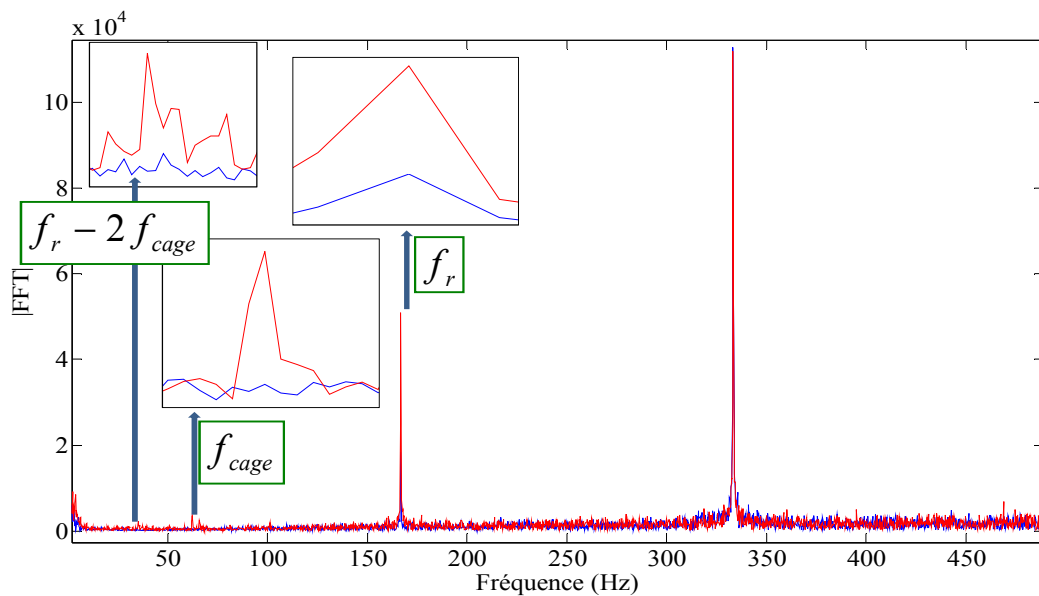


Figure 3-7 : Contenu fréquentiel du spectre vitesse – Cas sain (bleu) et défaillant (rouge) à 10 000 tr/min

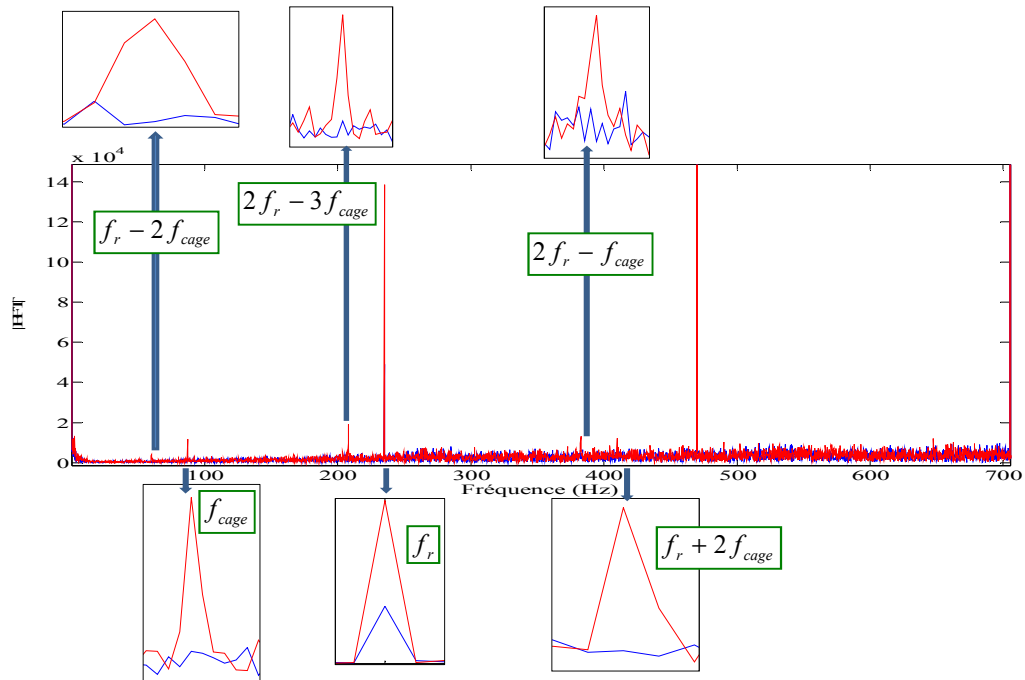


Figure 3-8 : Contenu fréquentiel du spectre vitesse – Cas sain (bleu) et défaillant (rouge) à 14 100 tr/min

3.3.2 Etude du signal position

Compte tenu des familles harmoniques liées au défaut mis en évidence dans le signal vitesse, le signal de position doit donc théoriquement présenter des harmoniques aux fréquences référencées dans le tableau 3-6. Rappelons que la prédiction de ces familles de fréquences est relative aux lois de composition mises en évidence dans le chapitre 2.

	Harmoniques vitesse	Harmoniques position attendus
Existent en régime sain et en régime défaillant	f_r $2f_r$	$(2k + 1)f_s \pm nf_r$
Propres au régime défaillant	f_{cage}	$(2k + 1)f_s \pm nf_{cage}$
	$f_r - 2f_{cage}$	$(2k + 1)f_s \pm n(f_r - 2f_{cage})$
	$2f_r - 3f_{cage}$	$(2k + 1)f_s \pm n(2f_r - 3f_{cage})$
	$2f_r - f_{cage}$	$(2k + 1)f_s \pm n(2f_r - f_{cage})$

Tableau 3-6 : Récapitulatif des harmoniques attendus dans le spectre de la position en régime défaillant

Le tableau 3-7 évalue ces harmoniques pour quelques valeurs particulières.

	Harmoniques attendus sur la position	Valeurs pour 12 000 tr/min
Familles harmoniques présentent régime sain et en régime défaillant pour $k = 0$	$f_s \pm f_r$	400 Hz - 800 Hz
	$f_s \pm 2f_r$	200 Hz - 1000 Hz
Familles harmoniques propres régime défaillant pour $k = 0$	$f_s \pm f_{cage}$	525 Hz - 625 Hz
	$f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$	550 Hz - 650 Hz
	$f_s \pm (2f_r - 3f_{cage})$	425 Hz - 775 Hz
	$f_s \pm (2f_r - f_{cage})$	275 Hz - 925 Hz

Tableau 3-7 : Calcul des harmoniques attendus dans le spectre de la position en régime défaillant

Du plus, rappelons également que la famille harmonique $k'f_r \pm f_{osc}$ apparaît en cas de défaut de calage des aimants. Compte tenu de l'existence de composantes harmoniques supplémentaires sur le spectre de la vitesse liées à la fréquence de cage, de nouveaux harmoniques liés à cette famille sont susceptibles d'apparaître (cf tableau 3-8 à tableau 3-11 pour les différentes vitesses).

Familles harmoniques liées au défaut de calage des aimants pour $k' = 1$	$f_r \pm f_{cage}$	125 Hz - 275 Hz
	$f_r \pm (f_r - 2f_{cage})$	150 Hz - 250 Hz
	$f_r \pm (2f_r - 3f_{cage})$	25 Hz - 375 Hz
	$f_r \pm (2f_r - f_{cage})$	125 Hz - 525 Hz

Tableau 3-8 : Calcul des harmoniques attendus dans le spectre de la position en régime défaillant liés à la famille $k'f_r \pm f_{osc}$ (décalage des aimants) à la vitesse 12 000 tr/min

Familles harmoniques liées au défaut de calage des aimants pour $k' = 1$	$f_r \pm f_{cage}$	82 Hz - 184 Hz
	$f_r \pm (f_r - 2f_{cage})$	102 Hz - 165 Hz
	$f_r \pm (2f_r - 3f_{cage})$	20 Hz - 247 Hz
	$f_r \pm (2f_r - f_{cage})$	82 Hz - 349 Hz

Tableau 3-9 : Calcul des harmoniques attendus dans le spectre de la position en régime défaillant liés à la famille $k'f_r \pm f_{osc}$ (décalage des aimants) à la vitesse 8000 tr/min

Familles harmoniques liées au défaut de calage des aimants pour $k' = 1$	$f_r \pm f_{cage}$	105 Hz 229 Hz
	$f_r \pm (f_r - 2f_{cage})$	124 Hz 209 Hz
	$f_r \pm (2f_r - 3f_{cage})$	19 Hz 314 Hz
	$f_r \pm (2f_r - f_{cage})$	105 Hz 438 Hz

Tableau 3-10 : Calcul des harmoniques attendus dans le spectre de la position en régime défaillant liés à la famille $k'f_r \pm f_{osc}$ (décalage des aimants) à la vitesse 10 000 tr/min

Familles harmoniques liées au défaut de calage des aimants pour $k' = 1$	$f_r \pm f_{cage}$	147 Hz 323 Hz
	$f_r \pm (f_r - 2f_{cage})$	177 Hz 293 Hz
	$f_r \pm (2f_r - 3f_{cage})$	30 Hz 440 Hz
	$f_r \pm (2f_r - f_{cage})$	147 Hz 617 Hz

Tableau 3-11 : Calcul des harmoniques attendus dans le spectre de la position en régime défaillant liés à la famille $k'f_r \pm f_{osc}$ (décalage des aimants) à la vitesse 14 100 tr/min

La figure 3-9 représente le spectre de position pour les cas sain et défaillant autour de la fréquence statorique pour une vitesse de 12 000 tr/min. Nous observons nettement sur cette figure une élévation énergétique pour les harmoniques attendus dans le tableau 3-7. L'amplitude de ces harmoniques augmente de manière significative par rapport au cas sain.

Les harmoniques faisant intervenir la fréquence de cage sont, comme dans le cas de la vitesse, uniquement présents dans le cas défaillant, contrairement aux familles liées seulement à f_r et f_s qui sont présentes dans les deux régimes de fonctionnement. La présence des harmoniques référencés dans le tableau 3-8 est plus aléatoire. Quand ils sont présents, l'augmentation de leur amplitude n'est pas significative par rapport aux harmoniques du tableau 3-7. Ces harmoniques ne seront pas donc utilisés pour la détection.

Sur la figure 3-10, nous montrons le spectre de position pour un enregistrement sain et un autre défaillant pour la vitesse 8000 tr/min (idem pour la figure 3-11 à la vitesse 10 000 tr/min et figure 3-12 à la vitesse 14 100 tr/min). Nous retrouvons bien les harmoniques attendus. Pour toutes les vitesses, les signatures liées au défaut sont donc nettement perceptibles sur les fréquences sélectionnées.

3.3 Etude des spectres : Comparaison entre enregistrements sains et défectueux

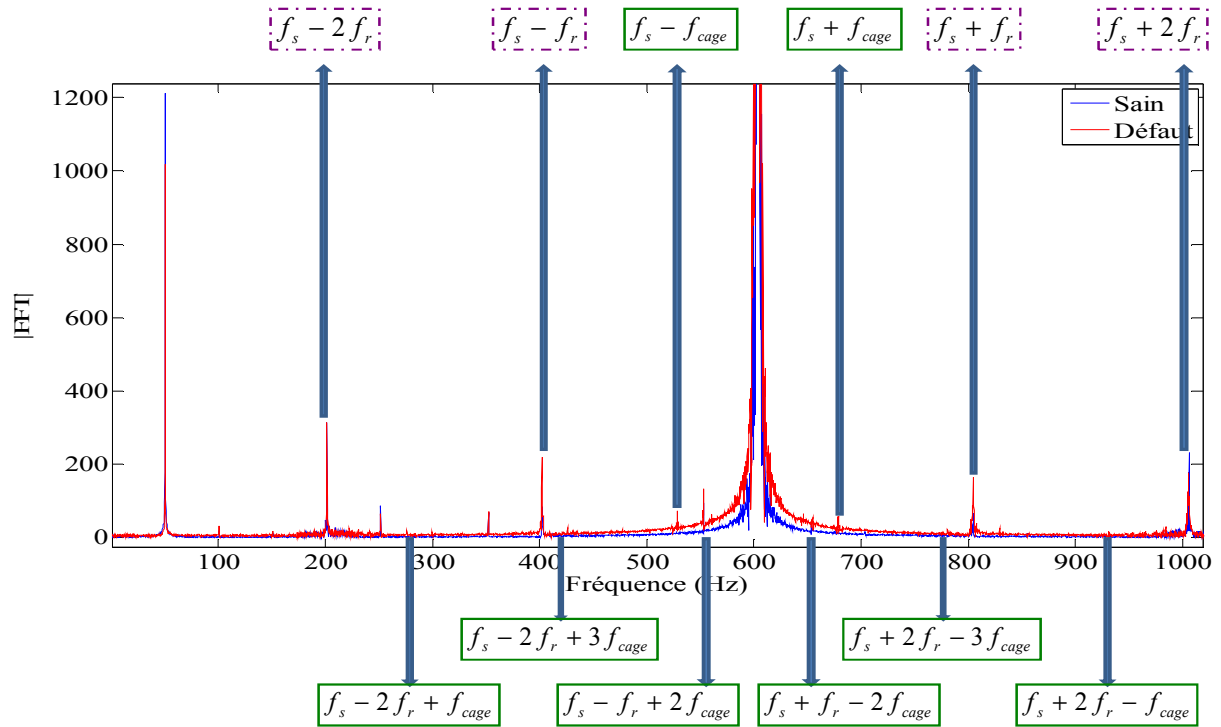


Figure 3-9 : Contenu fréquentiel du spectre du signal position – Cas sain et défectueux – 12 000 tr/min

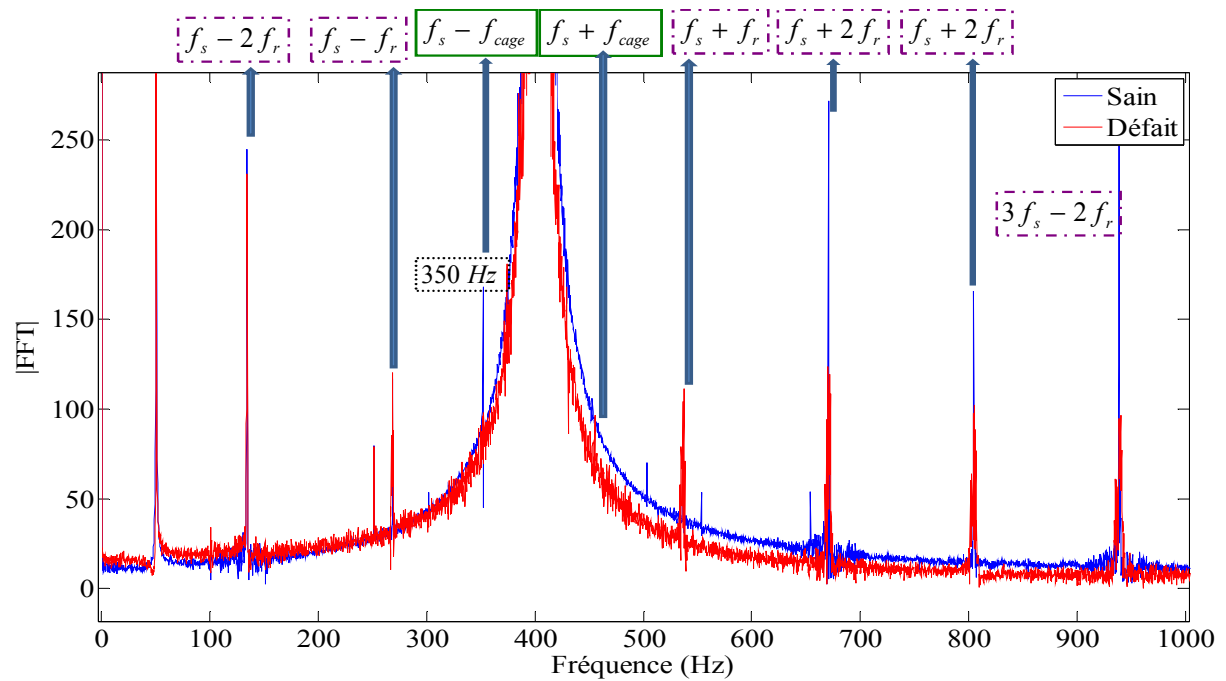


Figure 3-10 : Contenu fréquentiel du spectre du signal position – Cas sain et défectueux – 8 000 tr/min

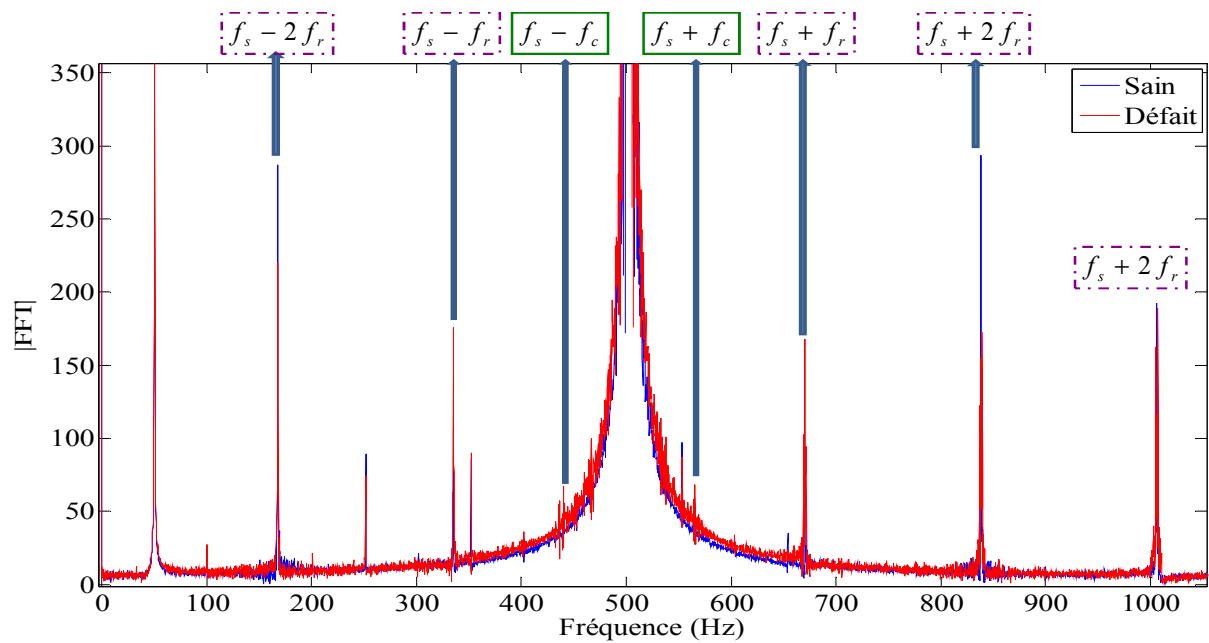


Figure 3-11 : Contenu fréquentiel du spectre du signal position – Cas sain et défectueux – 10 000 tr/min

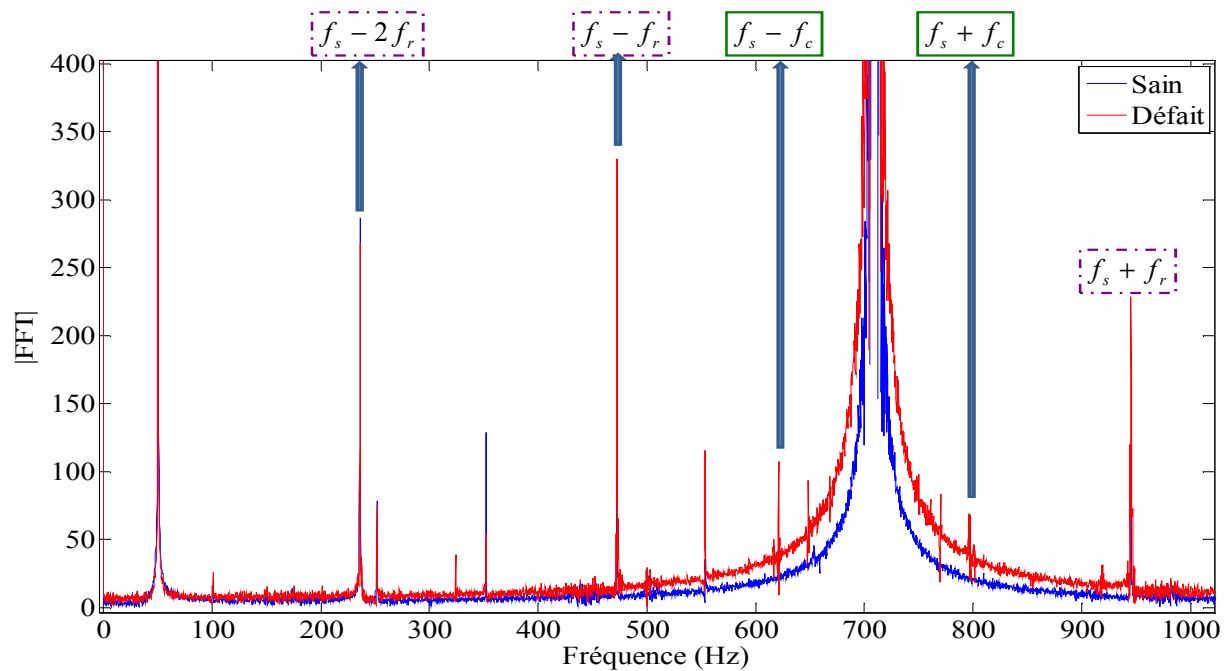


Figure 3-12 : Contenu fréquentiel du spectre du signal position – Cas sain et défectueux – 14 100 tr/min

3.3.3 Etude du signal courant de phase

Compte tenu des familles harmoniques présentes dans le signal vitesse, le signal courant statorique doit donc présenter des harmoniques aux fréquences référencées tableau 3-12.

	Harmoniques vitesse	Harmoniques courant attendus
Existe en régime sain	f_r	$(6k + 1)f_s \pm n f_r$
	$2f_r$	
Propre au régime défaillant	f_{cage}	$(6k + 1)f_s \pm n f_{cage}$
	$f_r - 2f_{cage}$	$(6k + 1)f_s \pm n(f_r - 2f_{cage})$
	$2f_r - 3f_{cage}$	$(6k + 1)f_s \pm n(2f_r - 3f_{cage})$
	$2f_r - f_{cage}$	$(6k + 1)f_s \pm n(2f_r - f_{cage})$

Tableau 3-12 : Récapitulatif des harmoniques attendus dans le spectre du courant statorique en régime défaillant sans défaut de calage aimants ou capteurs

La figure 3-13 représente le spectre de ce signal pour un enregistrement sain et un défaillant. Sur cette figure, nous remarquons que parmi les familles propres au défaut de roulements, seuls les harmoniques à $f_s \pm f_{cage}$, correspondant à la famille $(6k + 1)f_s \pm n f_{cage}$, permettent de distinguer les cas sain et défaillant, même s'ils sont proches du niveau de bruit du spectre. Les autres harmoniques comportant la fréquence de cage sont noyés dans le bruit de fond du spectre. L'élévation de leur amplitude devient difficilement exploitable de manière fiable pour différentes vitesses, pour la détection de défauts de roulements.

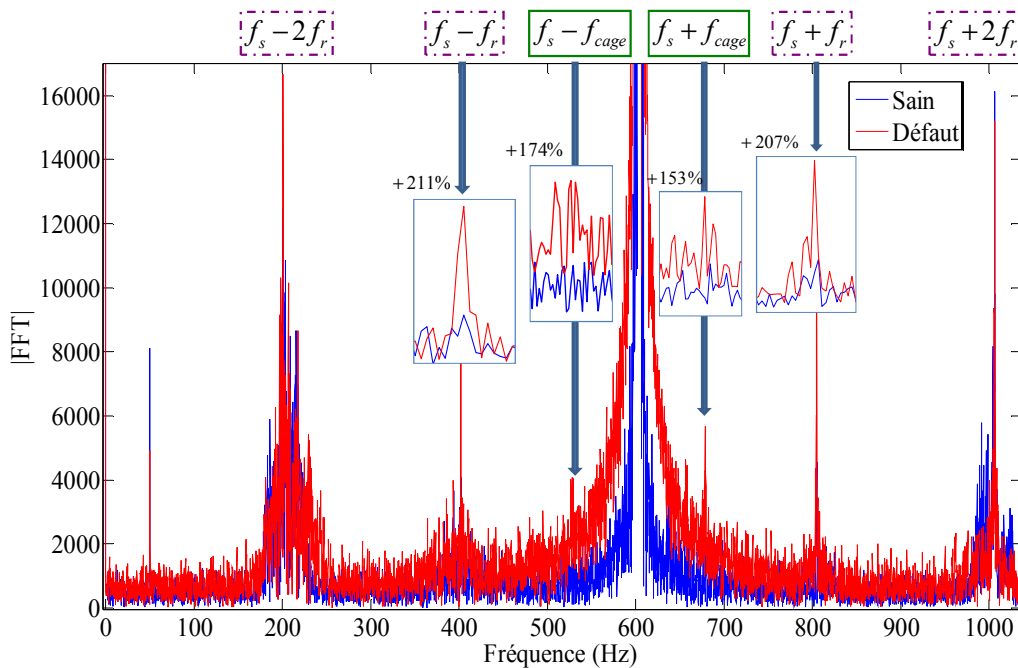


Figure 3-13 : Contenu fréquentiel du spectre de courant statorique – Cas sain et défaillant – 12 000 tr/min

En plus de la présence des harmoniques liés à la fréquence de cage, nous constatons également une augmentation de l'énergie de certains harmoniques liés à la famille $(6k \pm 1)f_s \pm nf_r$.

Le spectre de courant est également présenté sur les figures (figure 3-14, figure 3-15 et figure 3-16) pour les vitesses 14 100, 10 000 et 8000 tr/min. La vitesse 14 100 tr/min (figure 3-14) est un cas particulier où nous observons en plus des harmoniques des familles $(6k + 1)f_s \pm nf_{cage}$ et $(6k + 1)f_s \pm nf_r$, des harmoniques de forme $kf_s \pm nf_{asy}$. Ces harmoniques sont présents en sain comme en défaillant et sont liés au phénomène d'asynchronisme évoqué dans le paragraphe 2.12.5. L'asynchronisme existe aussi pour 12 000 tr/min mais se confond alors avec les multiples de f_r et n'est donc pas distinguable.

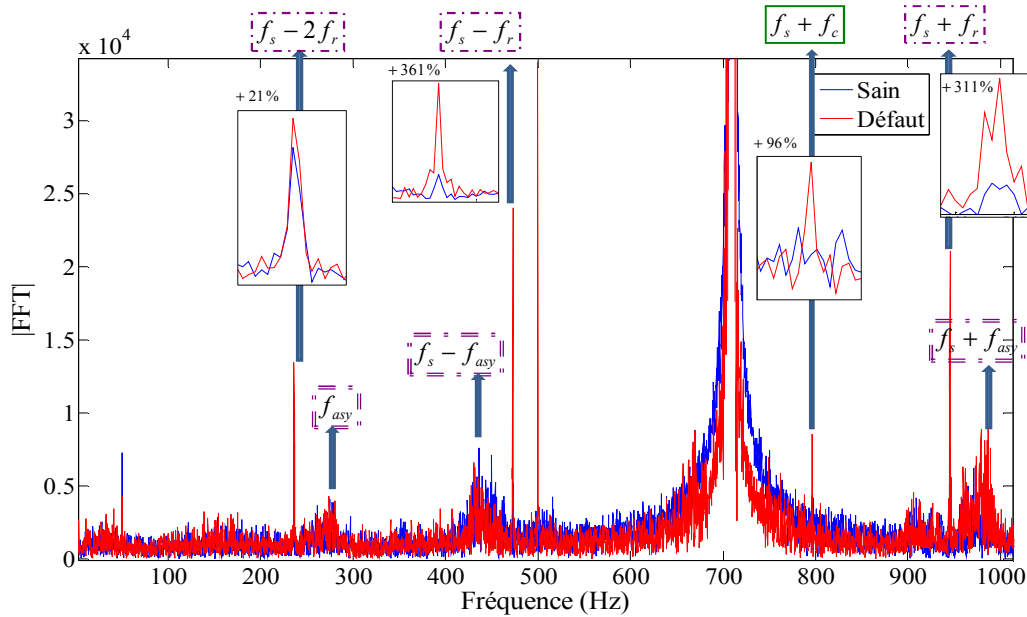


Figure 3-14 : Contenu fréquentiel du spectre de courant statorique – Cas sain et défaillant – 14 100 tr/min

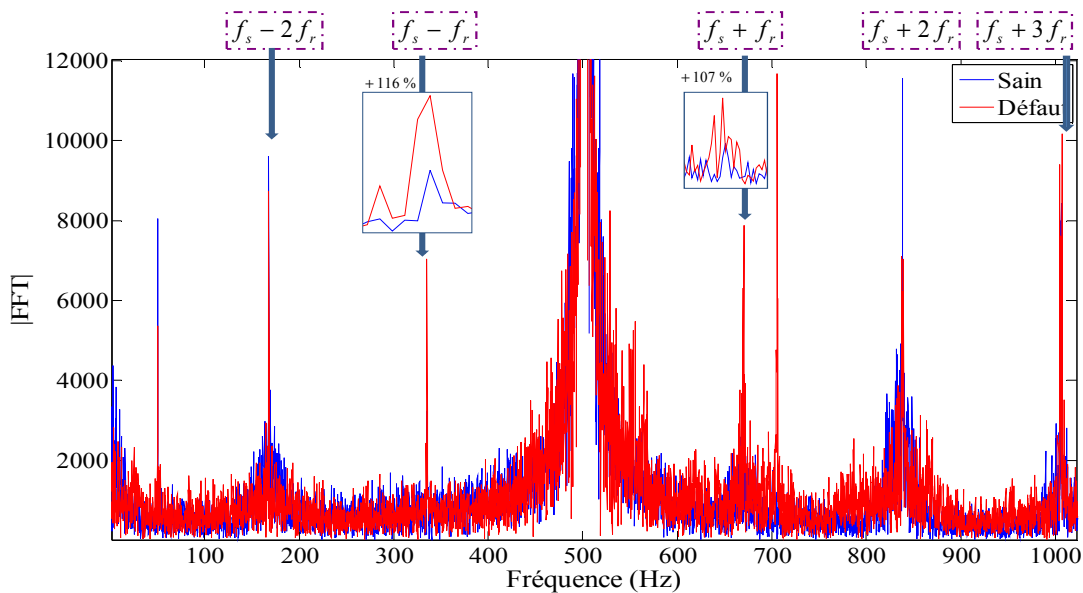


Figure 3-15 : Contenu fréquentiel du spectre de courant statorique – Cas sain et défaillant – 10 000 tr/min

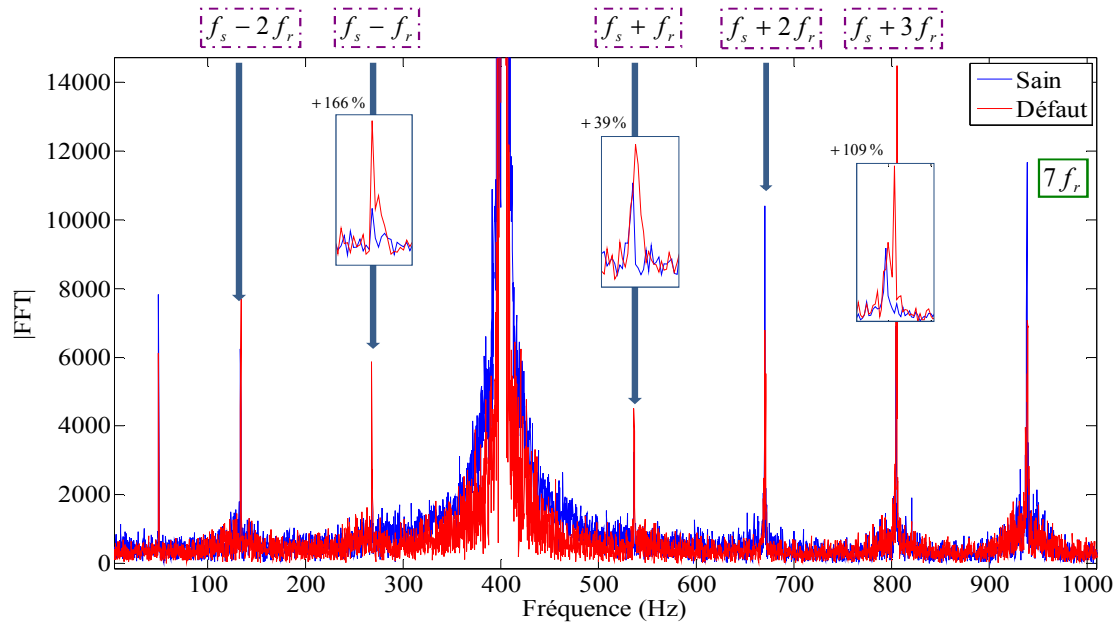


Figure 3-16 : Contenu fréquentiel du spectre de courant statorique – Cas sain et défectueux – 8000 tr/min

En première conclusion de ces analyses du spectre du courant statorique, il est semblable difficile de détecter le défaut de roulements par surveillance des signaux aux de la seule famille fréquences caractéristiques de cage dans le spectre de courant, c'est-à-dire $f_s \pm f_{cage}$. Les seuls harmoniques qui présentent une augmentation d'énergie significative dans le spectre de courant pour toutes les vitesses sont les harmoniques $f_s \pm f_r$, appartenant à la famille généralisée $(6k \pm 1)f_s \pm f_r$.

Des études sur le courant statorique issu d'une machine asynchrone [105][82][106] montrent l'apparition des harmoniques modulés autour de la fréquence statorique.

3.3.4 Etude du signal courant d'onduleur

	Harmoniques vitesse	Harmoniques courant onduleur attendus
Existe en régime sain	f_r $2f_r$	$6kf_s \pm nf_r$
	f_{cage}	$6kf_s \pm nf_{cage}$
Propre au régime défectueux	$f_r - 2f_{cage}$	$6kf_s \pm n(f_r - 2f_{cage})$
	$2f_r - 3f_{cage}$	$6kf_s \pm n(2f_r - 3f_{cage})$
	$2f_r - f_{cage}$	$6kf_s \pm n(2f_r - f_{cage})$

Tableau 3-13 : Récapitulatif des harmoniques attendus dans le spectre du courant d'onduleur en régime défectueux sans défaut de calage aimants ou capteurs

Compte tenu des familles harmoniques présentes dans le signal vitesse, le signal courant d'onduleur doit donc présenter des harmoniques aux fréquences référencées tableau 3-13.

La figure 3-17 représente le spectre du courant d'onduleur pour un enregistrement sain et un enregistrement défaillant. Nous observons bien une augmentation de l'énergie des familles harmoniques liées à la composante à f_r sur la vitesse (harmoniques à $6kf_s \pm f_r$). Nous constatons également une augmentation des énergies des harmoniques de la famille $2kf_s \pm f_r$ notamment pour $k = 1$. L'origine de ces harmoniques est rappelons le, liée à un décalage de capteur accompagné, ou à un décalage d'aimant (famille kf_r), tous deux accompagnés d'une oscillation de vitesse à la fréquence f_r .

Les autres familles présentant un niveau d'énergie plus important en défaillant qu'en régime sain sont les modulations de la famille $kf_r \rightarrow kf_r \pm f_{osc}$, d'où la présence des composantes à $f_r, 2f_r, \dots$

Parmi les familles propres au défaut de roulements, seul l'harmonique à f_{cage} , correspondant à la famille $6kf_s \pm nf_{cage}$ avec $k = 0$, permet de distinguer les cas sain et défaillant. Comme le montre la figure 3-18, qui présente le contenu fréquentiel du spectre de courant d'onduleur autour de l'harmonique $6f_s$, les harmoniques à $6f_s \pm f_{cage}$ sont très proche du niveau de bruit. L'extraction d'information autour de ces fréquences risque donc de présenter des difficultés.

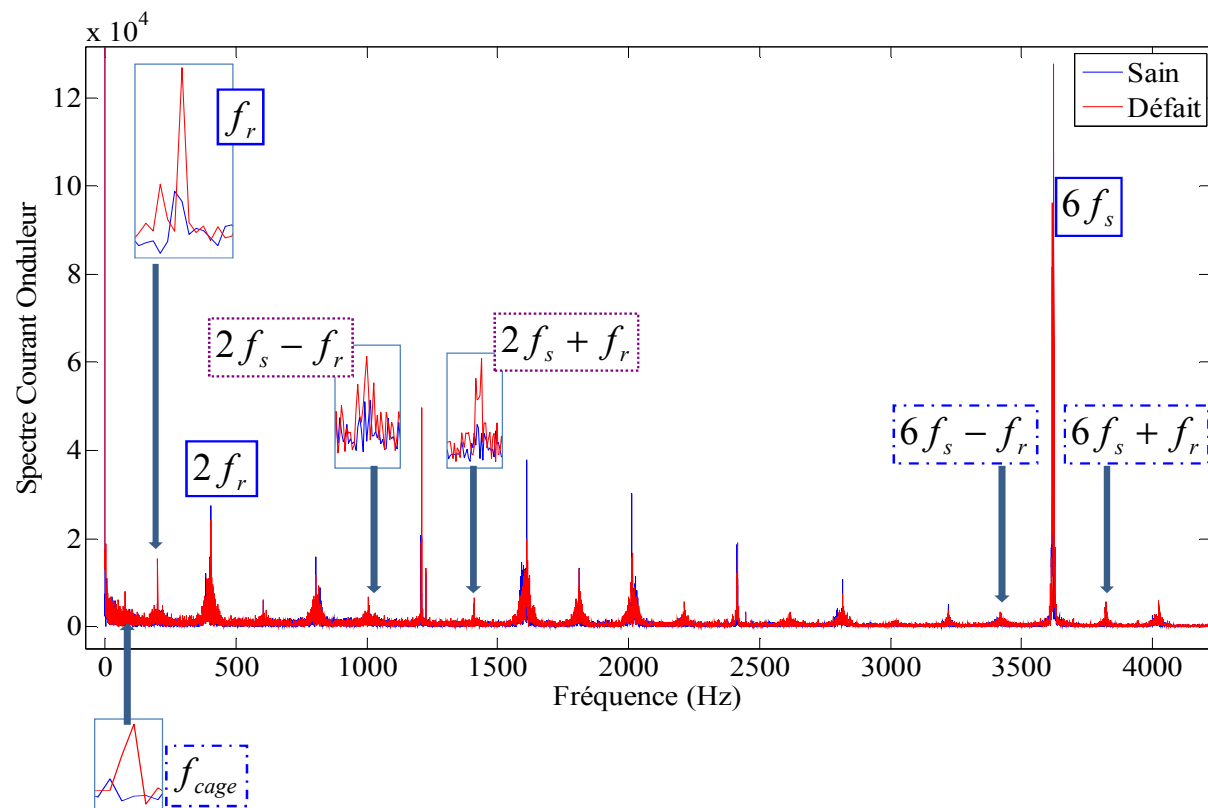


Figure 3-17 : Contenu fréquentiel du spectre de courant d'onduleur – Cas sain et défaillant – 12 000 tr/min

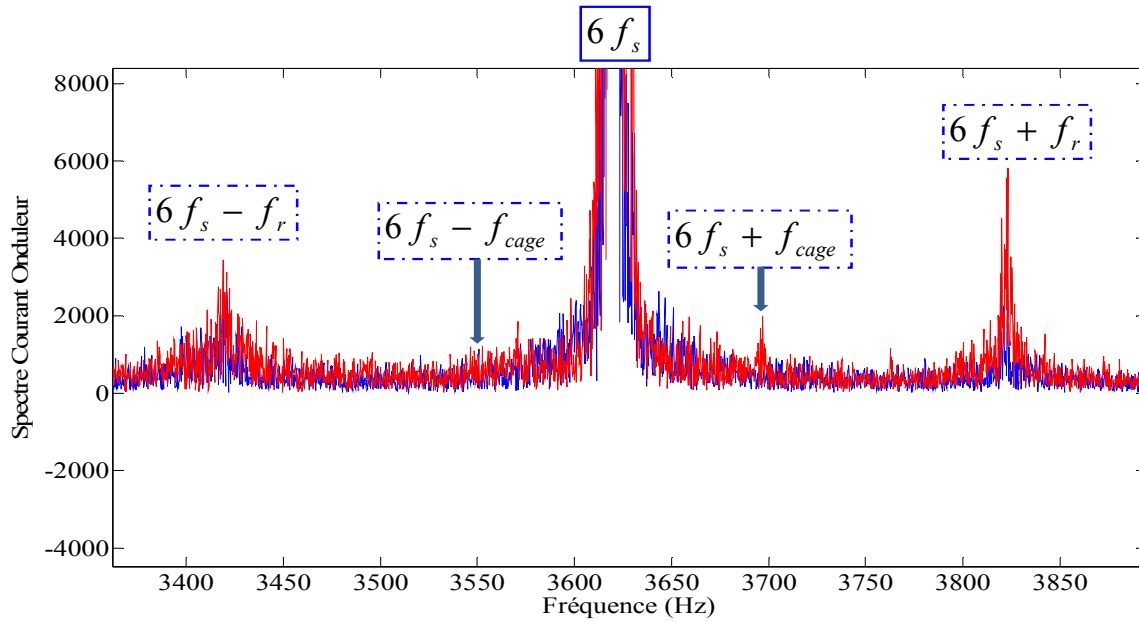


Figure 3-18 : Contenu fréquentiel du spectre de courant d'onduleur autour de $6f_s$ – Cas sain et défectueux – vitesse 12 000 tr/min

Le spectre de courant d'onduleur est également présenté sur les figures (figure 3-19, figure 3-20 et figure 3-21) pour les vitesses 14100, 1000 et 8000 tr/min. La vitesse 14 100 tr/min (figure 3-19) est un cas particulier où nous observons en plus des harmoniques des familles $6kf_s \pm f_{cage}$ et $6kf_s \pm f_r$ des harmoniques de forme $6kf_s \pm nf_{asy}$ (pour $k = 0$) et $2kf_s \pm nf_{asy}$ (pour $k = 1$). Ces harmoniques sont présents en sain comme en défectueux et sont liés au phénomène d'asynchronisme évoqué dans le paragraphe 2.12.5. L'asynchronisme à la vitesse 12 000 tr/min se confond avec les multiples de f_r et n'est donc pas distinguable.

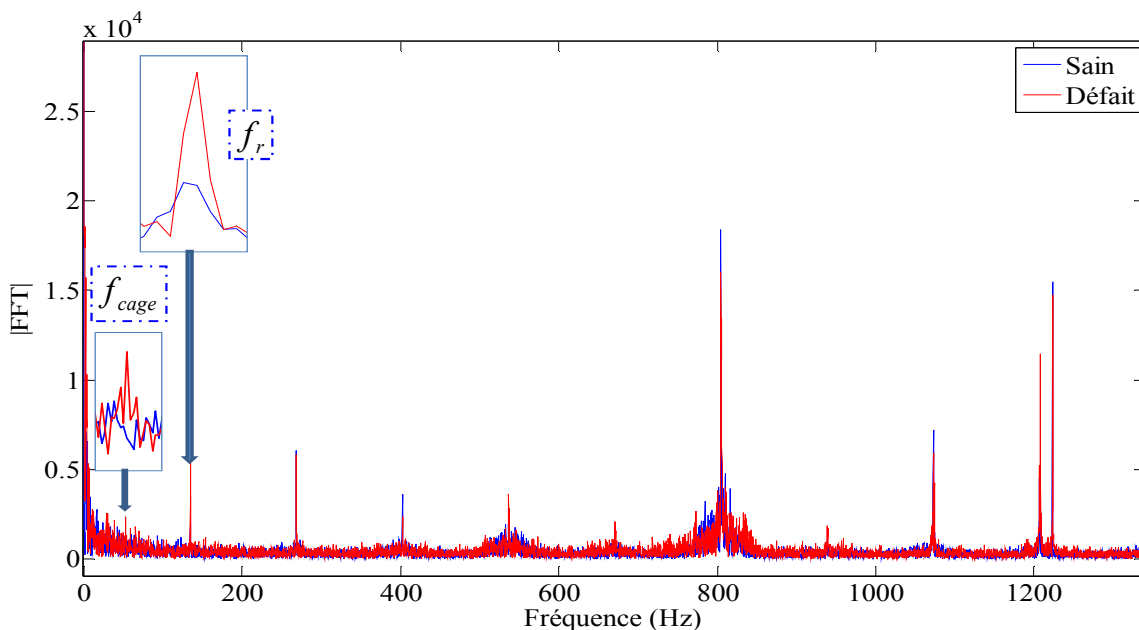


Figure 3-19 : Contenu fréquentiel du spectre de courant d'onduleur – Cas sain et défectueux – 14 100 tr/min

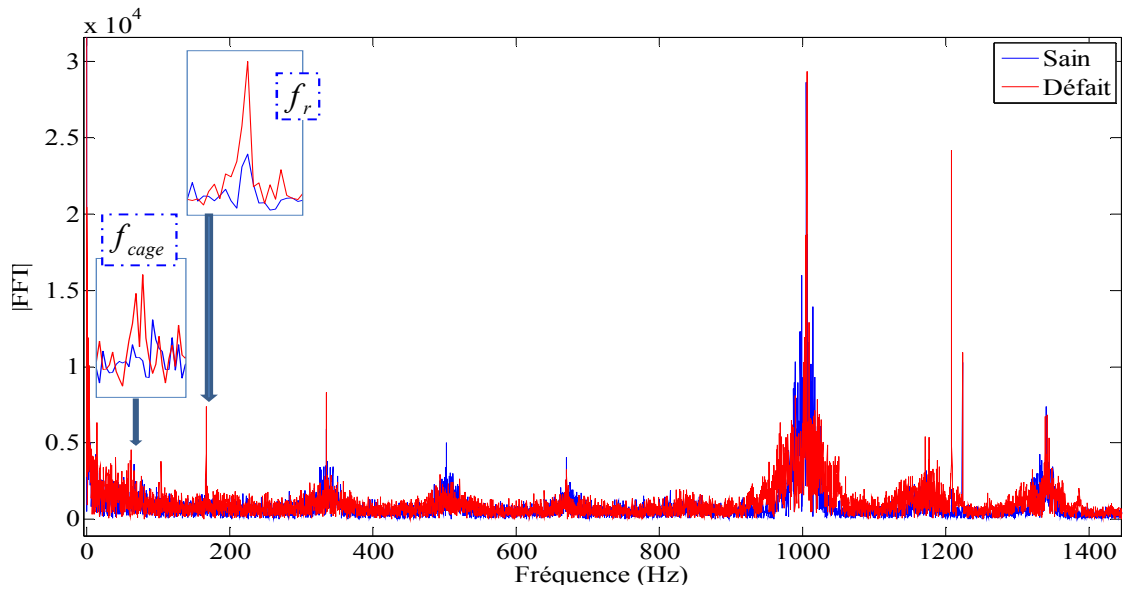


Figure 3-20 : Contenu fréquentiel du spectre de courant d'onduleur – Cas sain et défaillant – 10 000 tr/min

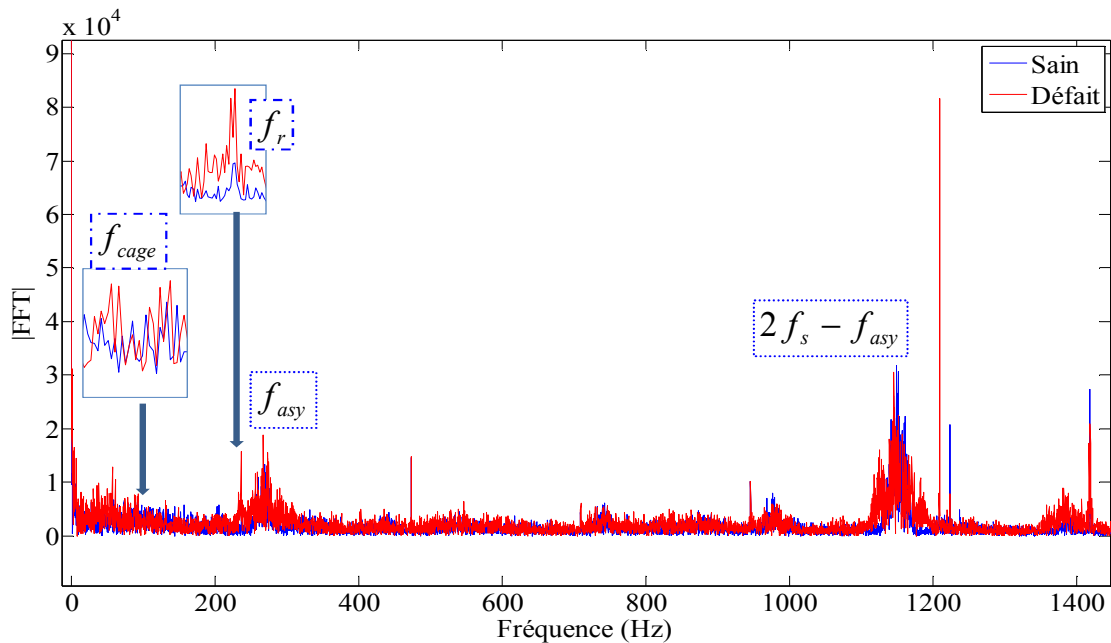


Figure 3-21 : Contenu fréquentiel du spectre de courant d'onduleur – Cas sain et défaillant – 8000 tr/min

Conclusion sur les signaux vitesse, position et courant en régime défaillant

L'analyse des grandeurs précédemment menées permet donc de montrer que l'introduction d'un roulement dégradé dans l'équipement, engendre des effets de modulation importants sur la vitesse de rotation de l'actionneur. Le spectre de la vitesse fait apparaître des augmentations d'énergie significatives sur certains harmoniques, notamment à des fréquences relatives à la fréquence caractéristique de cage f_{cage} , mais aussi à des fréquences déjà présentes en régime sain, comme l'harmoniques à f_r .

Les signatures de ces défaillances se retrouvent alors sur l'ensemble des grandeurs mesurées. Ainsi, le signal de position, le courant statorique et le courant d'onduleur comportent également des augmentations énergétiques liées à des familles fréquentielles que nous sommes capables de justifier grâce aux mécanismes de propagation mis en évidence dans le chapitre 2.

Parmi l'ensemble des grandeurs étudiés et des familles fréquentielles considérées, il faut maintenant réfléchir à des techniques d'extraction automatisée de l'information, qui permettront de construire un indicateur sensible à la dégradation du roulement. Comme nous l'avons déjà évoqué précédemment, les signatures sont propres à chaque grandeur et il semble évident que les indicateurs seront plus ou moins efficace et fiables en fonction des signaux, des vitesses et des gammes de fréquence utilisés. Il sera donc nécessaire d'établir des critères de qualité pour permettre, de manière quantitative, de classer leur efficacité.

Les mêmes familles de fréquences obtenues dans la campagne N°1 et sensibles au défaut sont présent en examinant la campagne N°2. La reproductibilité des signatures est donc justifiée.

3.4 Construction des indicateurs énergétiques

Les indicateurs énergétiques que nous proposons de construire seront établis à partir d'algorithmes de traitement dont l'objectif sera d'analyser automatiquement les variations d'amplitudes des familles harmoniques sensibles au défaut de roulements. Nous utiliserons, pour obtenir une représentation fréquentielle des signaux, une analyse de Fourier classique réalisée avec l'algorithme Fast Fourier Transform (FFT). Différents paramètres interviennent alors dans le réglage de cet algorithme, comme la fréquence f_e d'échantillonnage des signaux, ou le nombre de points N_p sur lequel est calculé la représentation fréquentielle. Ces paramètres conduisent à un paramètre important de l'analyse, à savoir la résolution fréquentielle Δf du spectre d'amplitude qui vaut :

$$\Delta f = \frac{f_e}{N_p} \quad (3-1)$$

Pour obtenir un indicateur qui soit le plus directement compatible avec une application temps réel, nous imposons quelques contraintes relatives au nombre de points N_p . Nous choisissons tout d'abord un nombre de points égalant une puissance de 2 (pour l'algorithme de FFT), de sorte que $N_p = 2^N$ points avec $N = 9, 10, 11, 12$. Ainsi, en fonction du N choisi, la fréquence d'échantillonnage se déduit de la résolution fréquentielle :

$$f_e = 2^N \Delta f \quad (3-2)$$

Plusieurs essais nous ont permis de montrer qu'une résolution fréquentielle minimale de 1 Hz était nécessaire pour conserver une bonne localisation des harmoniques liés à la fréquence de cage. Le signal $x_s(t)$ à analyser est donc sous-échantillonné à la fréquence f_e , puis découpé en tranches de 2^N points comme le résume la figure 3-22. La FFT de $x_s(t)$ est alors réalisée.

Dans des intervalles de fréquence $f_k \pm f_{balay}$, où f_k représente les composantes fréquentielles ciblées par l'indicateur, les valeurs maximales du spectre d'amplitude sont extraites.

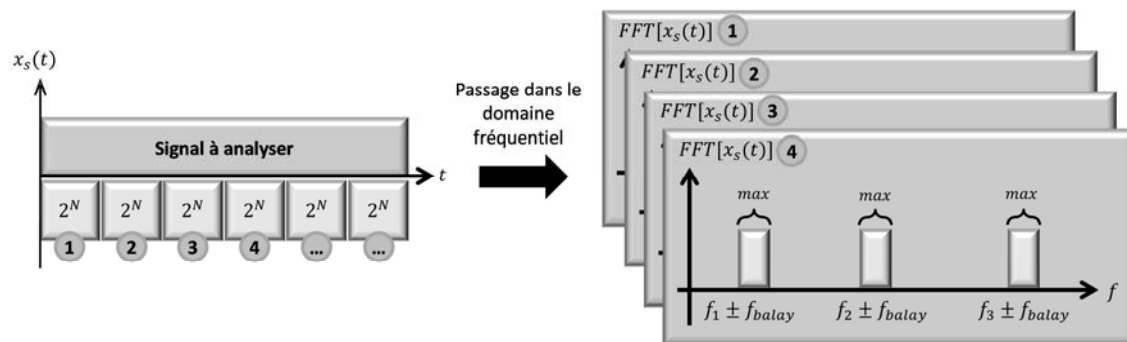


Figure 3-22 : Construction de l'indicateur énergétique

Les indicateurs pour l'ensemble de la campagne sont ensuite établis en traçant, en fonction des échantillons temporels prélevés, l'évolution de l'amplitude maximale des harmoniques dans la gamme de fréquence considérée.

Notons également que le signal de vitesse est un cas particulier car c'est un signal reconstruit, et non directement mesuré. Sa fréquence de calcul (donc d'échantillonnage) est liée aux fronts montants et descendants des signaux issus des capteurs de position utilisés pour sa reconstruction. Ainsi, pour une vitesse v donnée (en tr/min), la fréquence d'échantillonnage de la vitesse s'exprime par :

$$f_e(v) = 2 \times N_c \times 3 \times \frac{v}{60} \text{ Hz} \quad (3-3)$$

N_c est le nombre de capteurs de position utilisés pour reconstruire la vitesse :

N_c est égale à 1 pour la campagne N°1 et 3 pour la campagne N°2.

3.4.1 Indicateurs d'énergie sur le spectre de vitesse

Vitesse (tr/mn)	f_{cage}	$f_r - 2f_{cage}$	f_r	$2f_r - f_{cage}$	$2f_r - 3f_{cage}$	$f_r + 2f_{cage}$
8000	+	+	+	-	-	-
10 000	+	+	+	-	-	-
12 000	+	+	+	+	+	-
14 100	+	+	+	+	+	+

Tableau 3-14 : Rappel : Présence des harmoniques identifiés sur le spectre de vitesse pour différentes vitesses de fonctionnement

La figure 3-23 représente un indicateur calculé par extraction du maximum d'énergie autour de la fréquence considérée. La bande fréquentielle dans laquelle est extraite l'énergie

maximale est de $f_{balay} = \pm 10 \text{ Hz}$ autour de la fréquence étudiée et le nombre de points pour le calcul de la FFT est $N_p = 2^{11}$. Cet indicateur est déterminé pour les 117 enregistrements de la campagne 1, à la vitesse de 12 000 tr/min. Avec ces paramètres et pour cette vitesse, la résolution fréquentielle obtenue pour le spectre est de $\Delta f = 0,586 \text{ Hz}$.

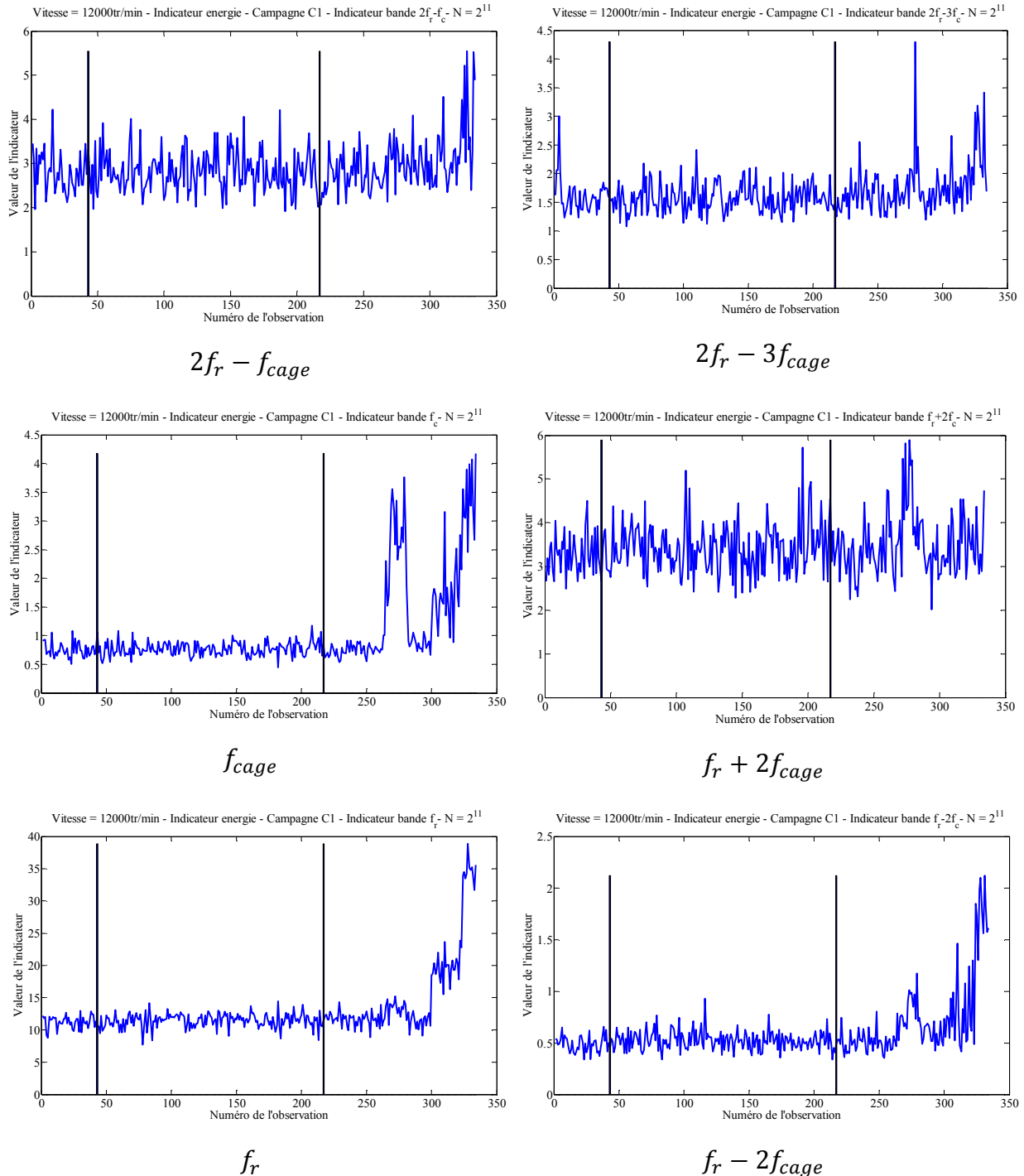


Figure 3-23 : Evolution des familles harmoniques dans le spectre de vitesse au cours de la vie du roulement pour une vitesse de 12 000 tr/min.

L'axe des x désigne le numéro de l'observation, comme nous avons déjà expliqué, une observation a une taille de 2^{11} points. Les deux traits sur les figures correspondent au

changement de roulement (trait de gauche) et à l'instant où l'indicateur vibratoire commence à réagir (trait de droite).

La fréquence à f_{cage} semble être la plus intéressante en terme de rapidité puisqu'elle réagit plus tôt que les autres fréquences à la présence du défaut de roulements. Celles à f_r et $f_r - 2f_{cage}$ réagissent également, mais moins rapidement et avec une sensibilité moindre.

Pour les autres fréquences et même si certaines d'entre elles apparaissent bien dans les spectres de la vitesse (figure 3-23 pour les fréquences $f_r + 2f_{cage}$, $2f_r - 2f_{cage}$ et $2f_r - 3f_{cage}$), leur évolution sur l'ensemble de la campagne d'essai n'apporte pas d'information réellement significative. Ceci souligne encore la variabilité des résultats selon les vitesses de rotation et les fréquences choisies.

La campagne d'essais n°2 confirme cette non reproductibilité totale des résultats, ce qui constitue une difficulté supplémentaire. Nous montrons sur les figures suivantes (figure 3-24 pour la vitesse 8000 tr/min, figure 3-25 pour la vitesse 10 000 tr/min et figure 3-26 pour la vitesse 14 100 tr/min) l'indicateur énergétique pour les différentes vitesses de fonctionnement et seulement pour les fréquences qui semblent être les plus pertinentes, à savoir f_{cage} , f_r et $f_r - 2f_{cage}$.

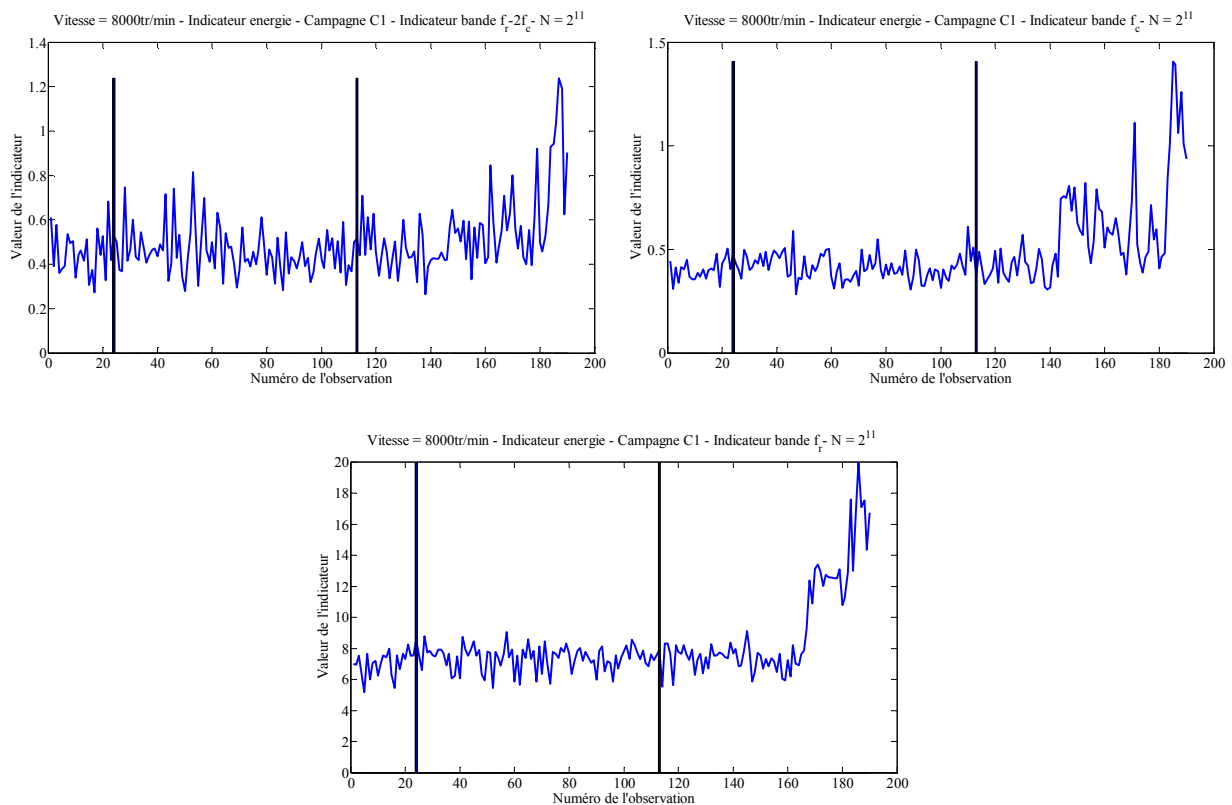


Figure 3-24 : Evolution des familles harmoniques dans le spectre de vitesse au cours de la vie du roulement pour une vitesse de 8 000 tr/min.

3.4 Construction des indicateurs énergétiques

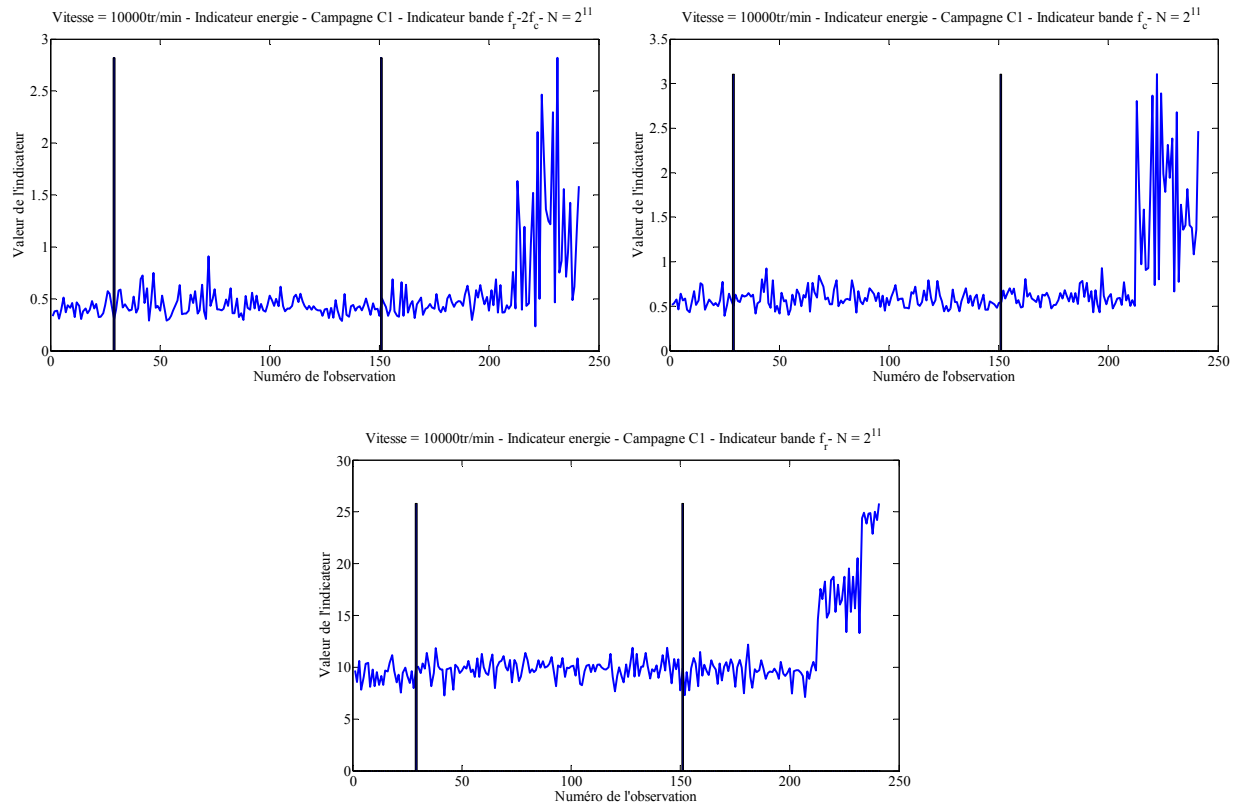


Figure 3-25 : Evolution des familles harmoniques dans le spectre de vitesse au cours de la vie du roulement pour une vitesse de 10 000 tr/min.

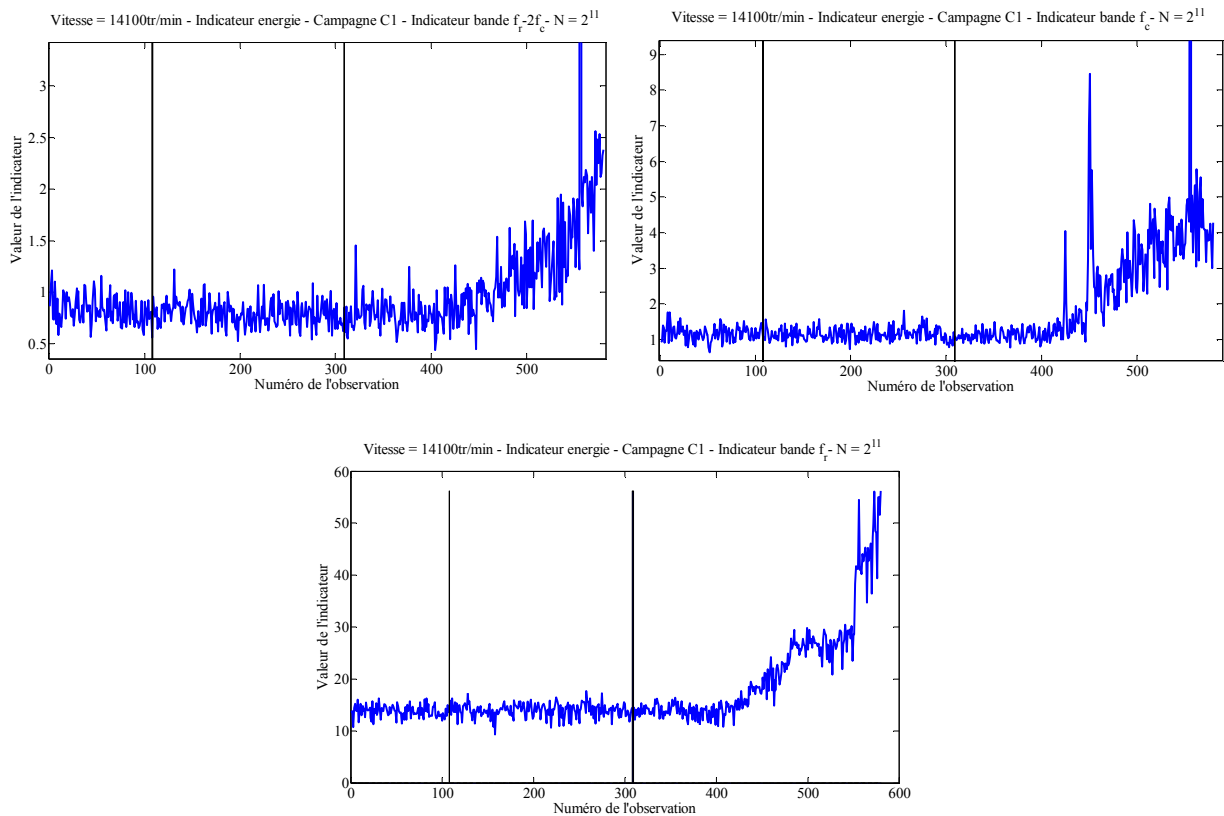


Figure 3-26 : Evolution des familles harmoniques dans le spectre de vitesse au cours de la vie du roulement pour une vitesse de 14 100 tr/min.

Conclusion sur les indicateurs énergétiques issus du signal de vitesse

L'exploitation de la vitesse de l'actionneur reconstituée semble être une piste intéressante pour la détection des défauts de roulements. Les évolutions des indicateurs montrent que, quelle que soit la vitesse de fonctionnement considérée, les fréquences les plus pertinentes pour la campagne d'essai N°1 se situent dans bandes fréquentielles autour des harmoniques à f_{cage} , $f_r - 2f_{cage}$. Ce phénomène s'explique facilement en regard du défaut réalisé sur le roulement (cage brisée). La bande fréquentielle autour de f_r est également intéressante. En régime sain, cet harmonique est naturellement présent dans la vitesse mais la présence du roulement défaillant en augmente l'amplitude, principalement dans les dernières heures de vie du roulement.

Pour la campagne N°2, dont l'ensemble des résultats peut être consulté en Annexe C, nous remarquons que l'indicateur calculé autour de la bande fréquentielle f_r réagit mieux à la présence du défaut. Cela s'explique par le fait que le protocole de dégradation n'est certainement pas tout à fait identique pour les 2 campagnes, notamment par rapport à la détérioration de la cage qui n'est pas facilement reproductible à l'identique.

Une fois installé dans la machine, le roulement détérioré peut également vieillir de manière différente entre deux campagnes. Ces hypothèses sont renforcées par les allures des indicateurs vibratoires (figure 3-3 et figure 3-4) qui sont différentes pour les deux campagnes. Une manière de renforcer la fiabilité du diagnostic, de le « robustifier », pourrait consister à effectuer les mesures de spectre toujours à la même vitesse. Il suffirait de placer le fan à cette vitesse de test pendant quelques secondes de temps en temps, soit pendant le vol soit entre chaque vol de l'avion.

3.4.2 Indicateurs d'énergie sur le spectre position

Comme nous avons déjà expliqué au paragraphe 2.6.1, les signatures qui apparaissent dans le spectre de la vitesse aux fréquences liées à f_{osc} (ici f_r , f_{cage} , $f_r - 2f_{cage}$) doivent apparaître sur le spectre de position aux fréquences référencées dans le tableau 3-6. Nous proposons donc dans cette partie de définir 3 indicateurs pour l'analyse du signal issu du capteur de position :

- le premier exploite le spectre dans une bande fréquentielle centrée sur $f_s \pm f_r$,
- le deuxième exploite le spectre dans une bande fréquentielle centrée sur $f_s \pm f_{cage}$,
- Le troisième exploite le spectre dans une bande fréquentielle centrée sur $f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$.

3.4 Construction des indicateurs énergétiques

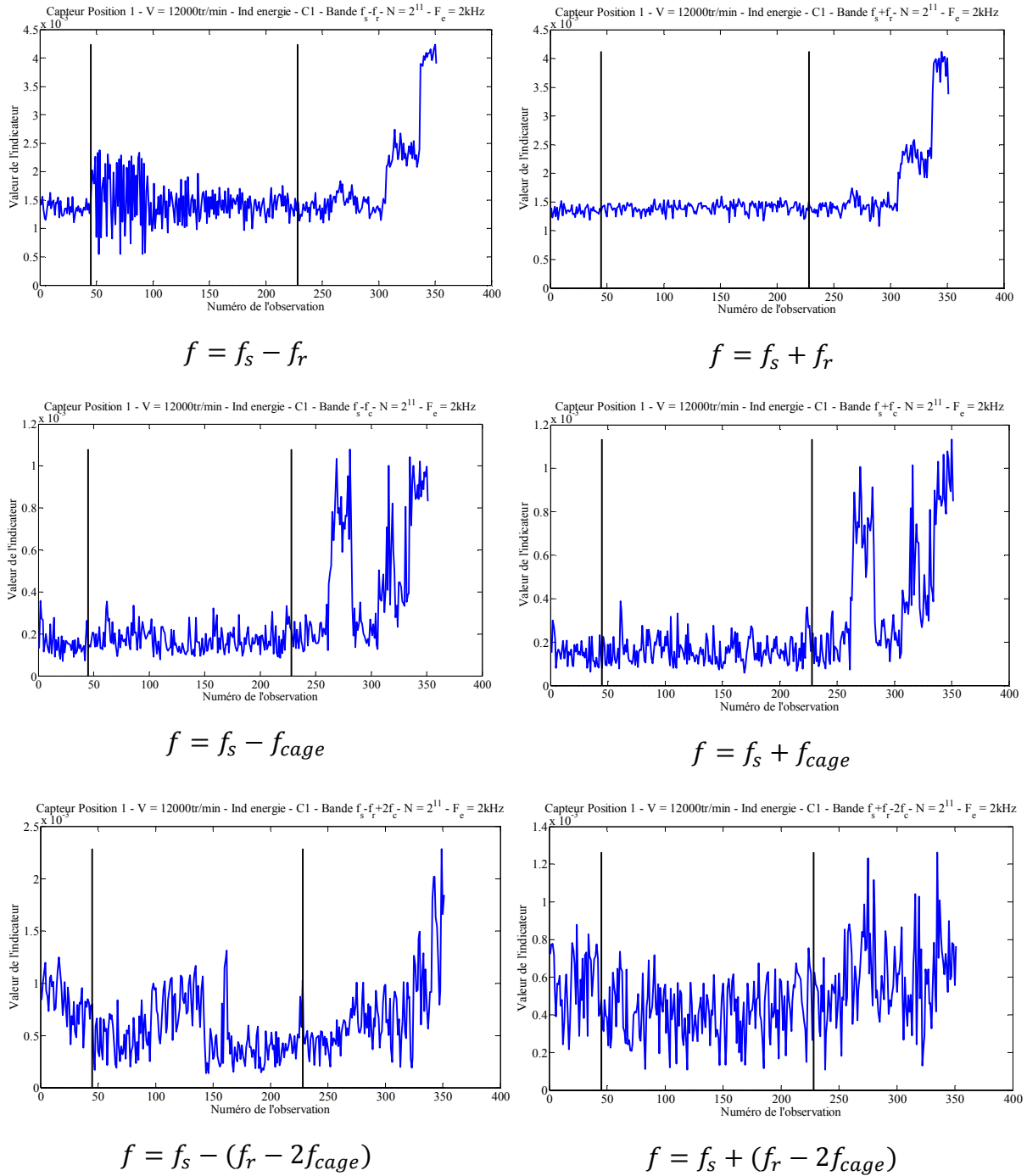
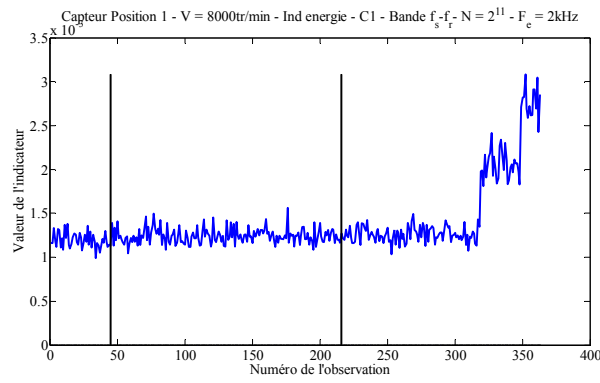
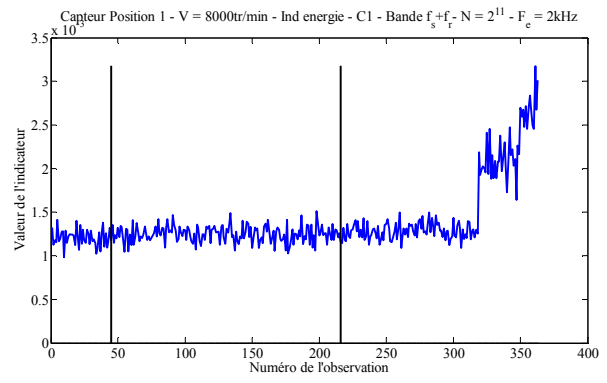


Figure 3-27 : Indicateur maximum d'énergie pour $f = f_s \pm f_r$, $f = f_s \pm f_{cage}$ et $f = f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$
Signal position à la vitesse 12 000 tr/min

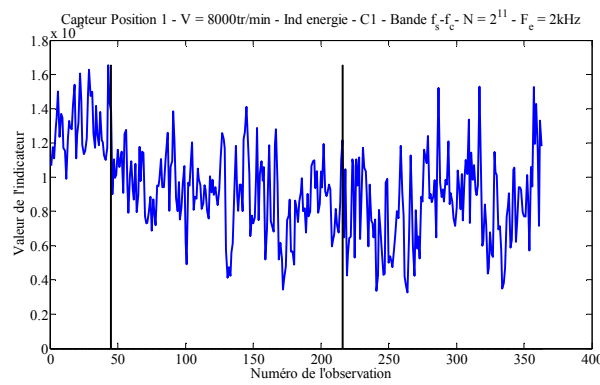
Sur la figure 3-27, sont présentés les résultats du calcul de l'indicateur sur les fréquences considérées, toujours par extraction du maximum d'énergie dans une bande de $\pm 10\text{ Hz}$ autour de ces fréquences. L'indicateur montre de bons résultats pour la fréquence $f_s \pm f_r$ et $f_s \pm f_{cage}$. Pour s'assurer de l'efficacité de la détection pour les autre vitesses, nous montrons sur les figures suivantes, l'indicateur construit pour les fréquences $f_s \pm f_r$, $f_s \pm f_{cage}$ et $f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ pour les vitesses 8000 tr/min (figure 3-28), 10 000 tr/min (figure 3-28) et 14 100 tr/min (figure 3-28).



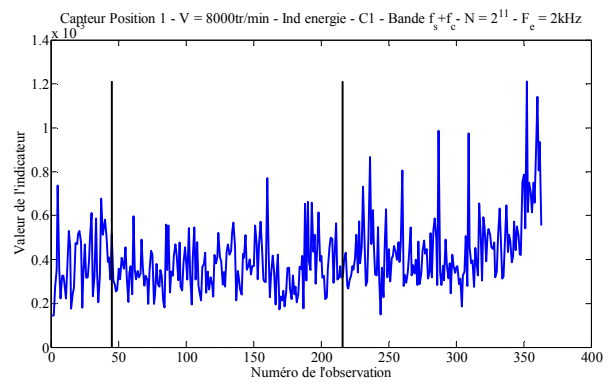
$$f = f_s - f_r$$



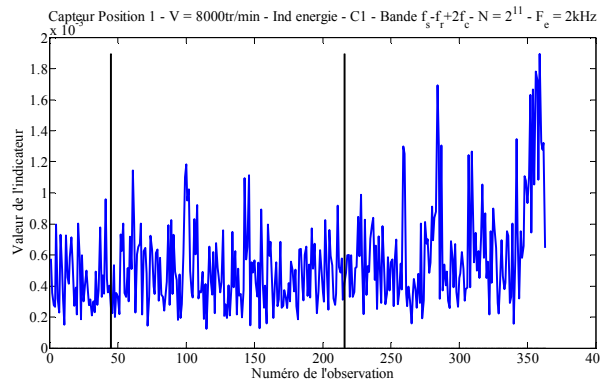
$$f = f_s + f_r$$



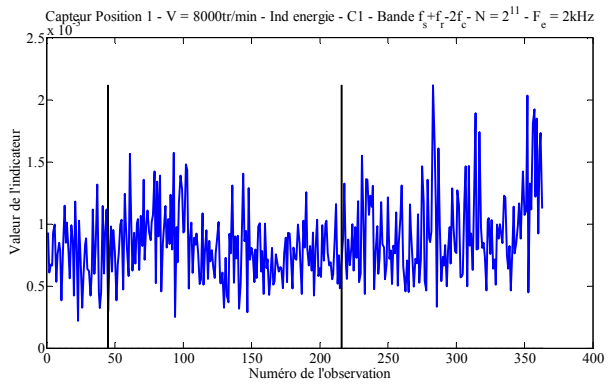
$$f = f_s - f_{cage}$$



$$f = f_s + f_{cage}$$



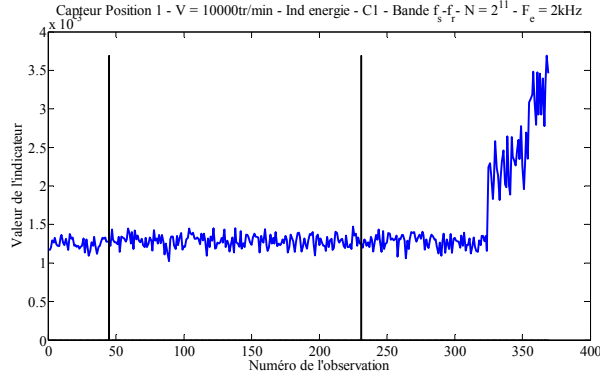
$$f = f_s - (f_r - 2f_{cage})$$



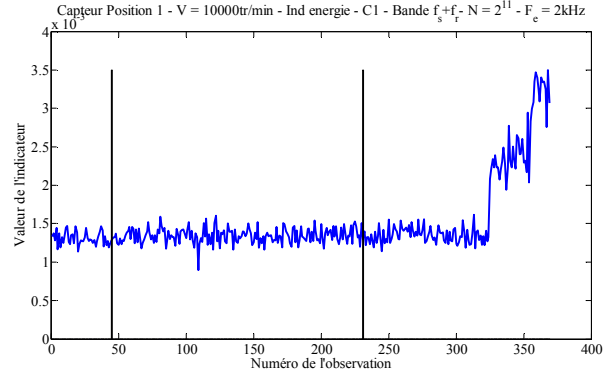
$$f = f_s + (f_r - 2f_{cage})$$

Figure 3-28 : Indicateur maximum d'énergie pour $f = f_s \pm f_r$, $f = f_s \pm f_{cage}$ et $f = f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ - Signal position à la vitesse 8000 tr/min

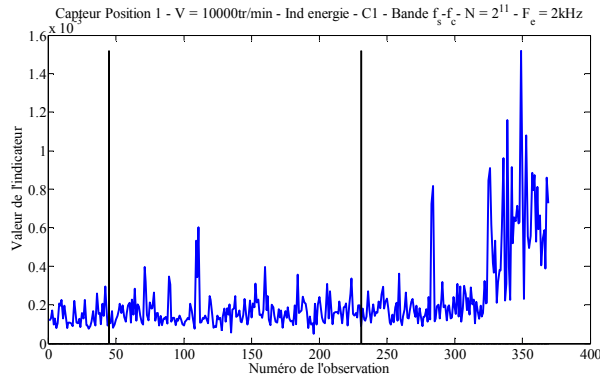
3.4 Construction des indicateurs énergétiques



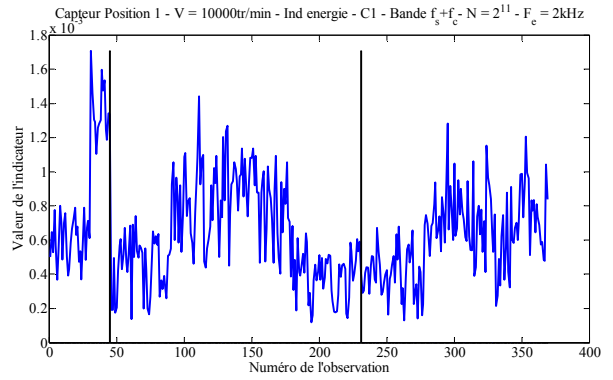
$$f = f_s - f_r$$



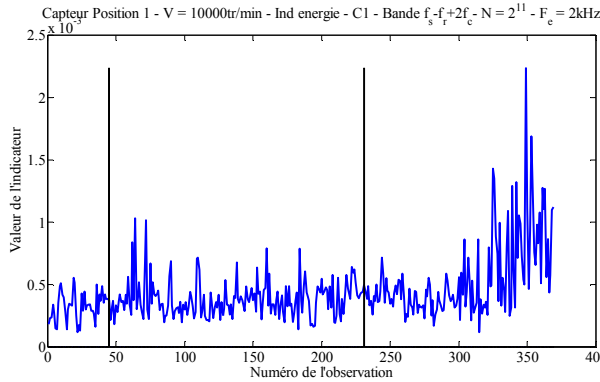
$$f = f_s + f_r$$



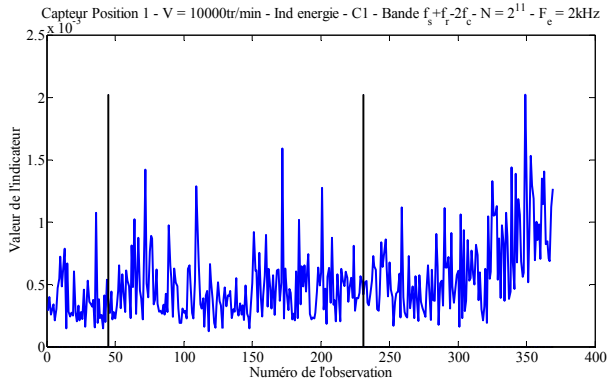
$$f = f_s - f_{cage}$$



$$f = f_s + f_{cage}$$



$$f = f_s - (f_r - 2f_{cage})$$



$$f = f_s + (f_r - 2f_{cage})$$

Figure 3-29 : Indicateur maximum d'énergie pour $f = f_s \pm f_r$, $f = f_s \pm f_{cage}$ et $f = f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ - Signal position à la vitesse 10 000 tr/min

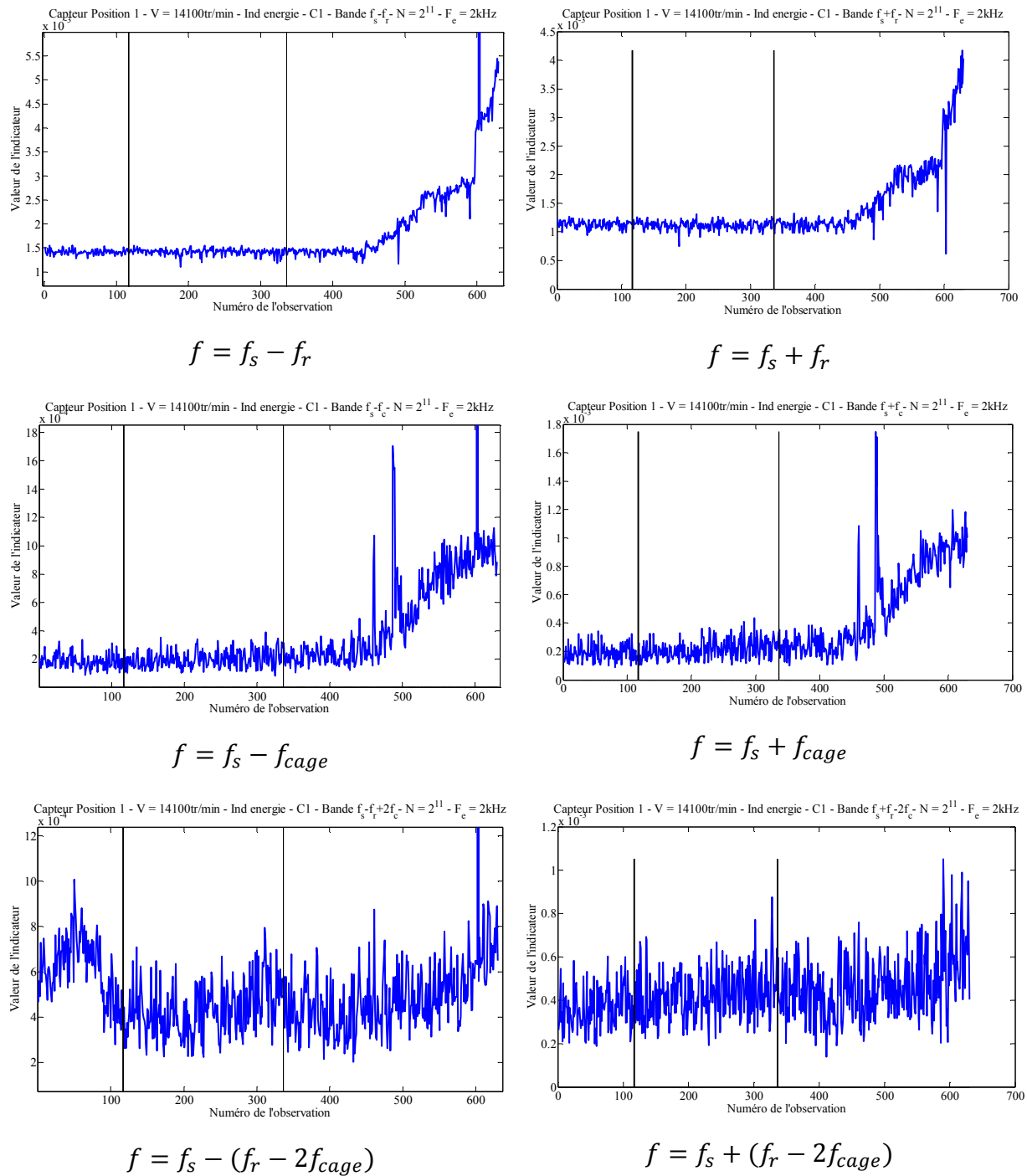


Figure 3-30 : Indicateur maximum d'énergie pour $f = f_s \pm f_r$, $f = f_s \pm f_{cage}$ et $f = f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ - Signal position à la vitesse 14 100 tr/min

Conclusion sur les indicateurs énergétiques sur le signal de position

Les résultats précédents montrent que les harmoniques les plus pertinents sont ceux à $f_s \pm f_{cage}$ et $f_s \pm f_r$. Les mêmes harmoniques ont été obtenus lors de l'analyse de l'indicateur de position de la campagne N°2.

3.4.3 Indicateurs d'énergie sur le spectre de courant statorique

Comme nous avons déjà expliqué au paragraphe 2.6.2, les signatures qui apparaissent dans le spectre de la vitesse aux fréquences liées à f_{osc} (ici $f_r, f_{cage}, f_r - 2f_{cage}$) doivent apparaître sur le spectre de courant statorique aux fréquences référencées dans le tableau 3-12. Nous proposons donc dans cette partie de définir 3 indicateurs pour l'analyse du signal issu du courant de phase :

- le premier exploite le spectre dans une bande fréquentielle centrée sur $f_s \pm f_r$,
- le deuxième exploite le spectre dans une bande fréquentielle centrée sur $f_s \pm f_{cage}$,
- Le troisième exploite le spectre dans une bande fréquentielle centrée sur $f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$.

La figure 3-31 représente les indicateurs énergétiques pour les fréquences $f_s \pm f_r$, $f_s \pm f_{cage}$ et $f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ pour le signal courant statorique à la vitesse 12000 tr/min. Nous constatons que l'indicateur se montre le plus efficace pour les fréquences $f_s \pm f_r$. Il se montre cependant relativement beaucoup moins sensible à la présence du défaut dans les bandes fréquentielles autour de $f_s \pm f_{cage}$. La bande fréquentielle autour de $f_s + (f_r - 2f_{cage})$ se révèle quant à elle inexploitable quelle que soit la vitesse de rotation.

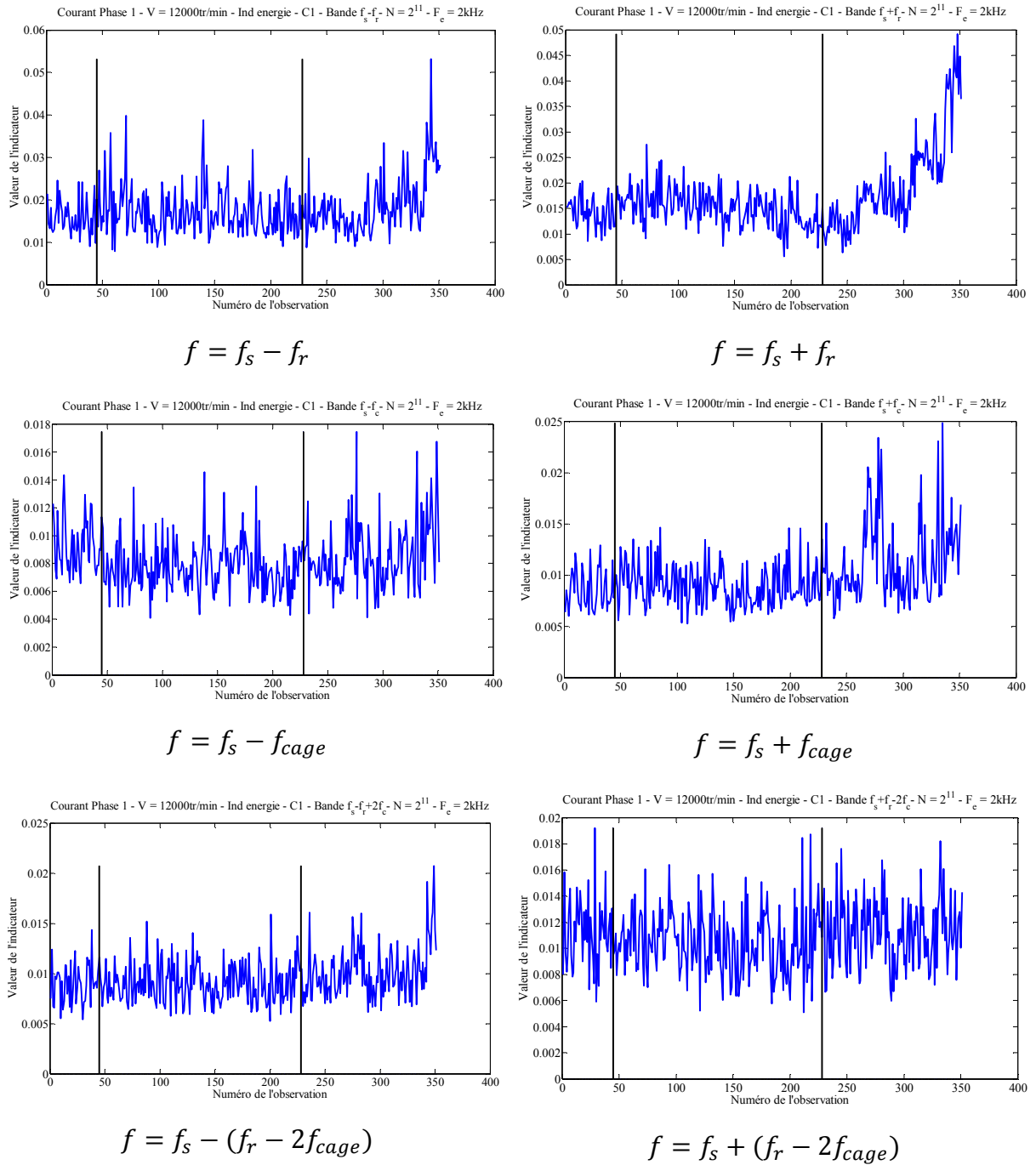
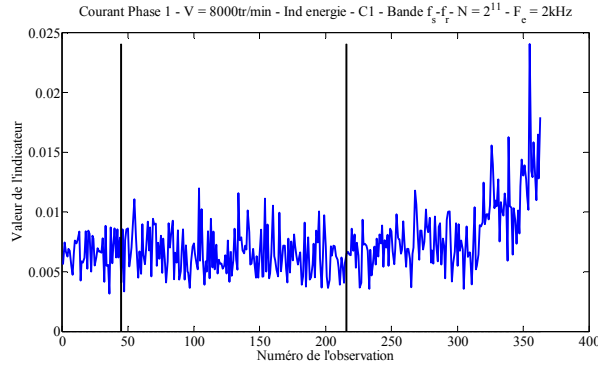


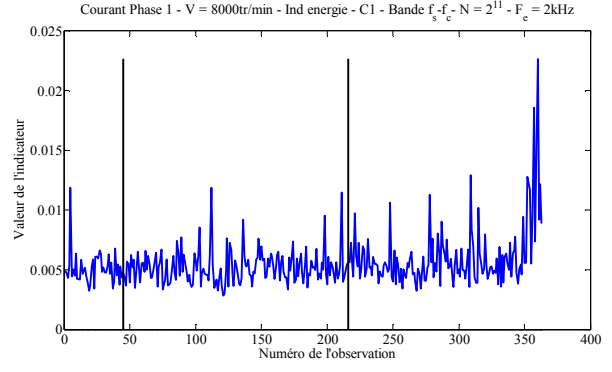
Figure 3-31 : Indicateur maximum d'énergie pour $f = f_s \pm f_r$, $f = f_s \pm f_{cage}$ et $f = f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$
Signal Courant statorique phase 1 à la vitesse 12 000 tr/min

Les figures suivantes montrent les indicateurs énergétiques calculés par valeur maximale pour les vitesses 8000 tr/min (figure 3-32), 10 000 tr/min (figure 3-33) et 14 100 tr/min (figure 3-34). Les mêmes conclusions peuvent être tirées de ces résultats que pour la vitesse de 12 000 tr/min.

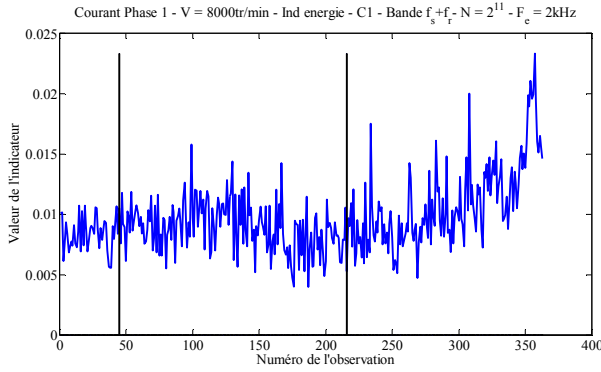
3.4 Construction des indicateurs énergétiques



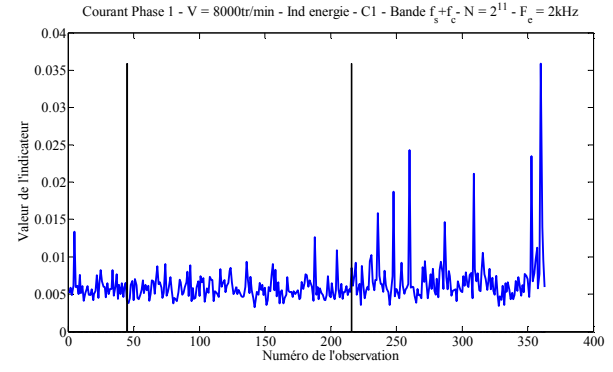
$$f = f_s - f_r$$



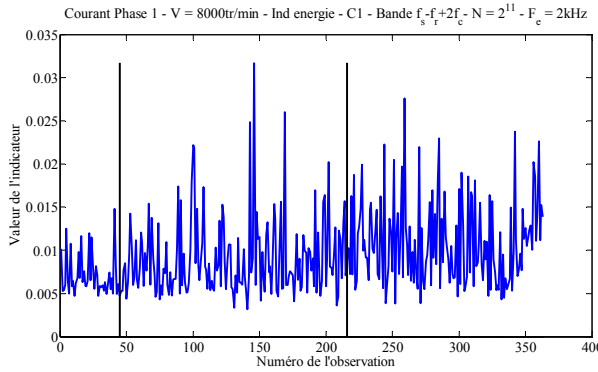
$$f = f_s - f_{cage}$$



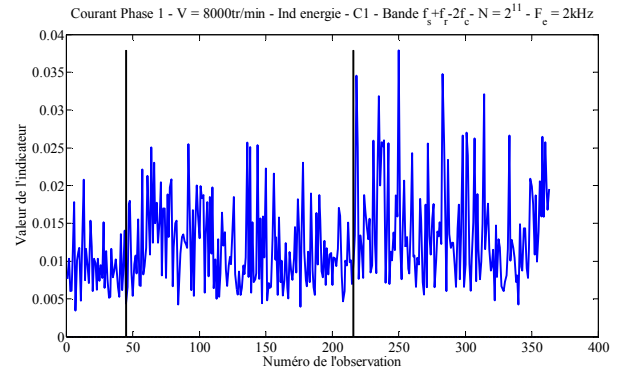
$$f = f_s + f_r$$



$$f = f_s + f_{cage}$$



$$f = f_s - (f_r - 2f_{cage})$$



$$f = f_s + (f_r - 2f_{cage})$$

Figure 3-32 : Indicateur Energie pour $f = f_s \pm f_r$, $f = f_s \pm f_{cage}$ et $f = f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ - Signal courant statorique phase 1 à 8000 tr/min

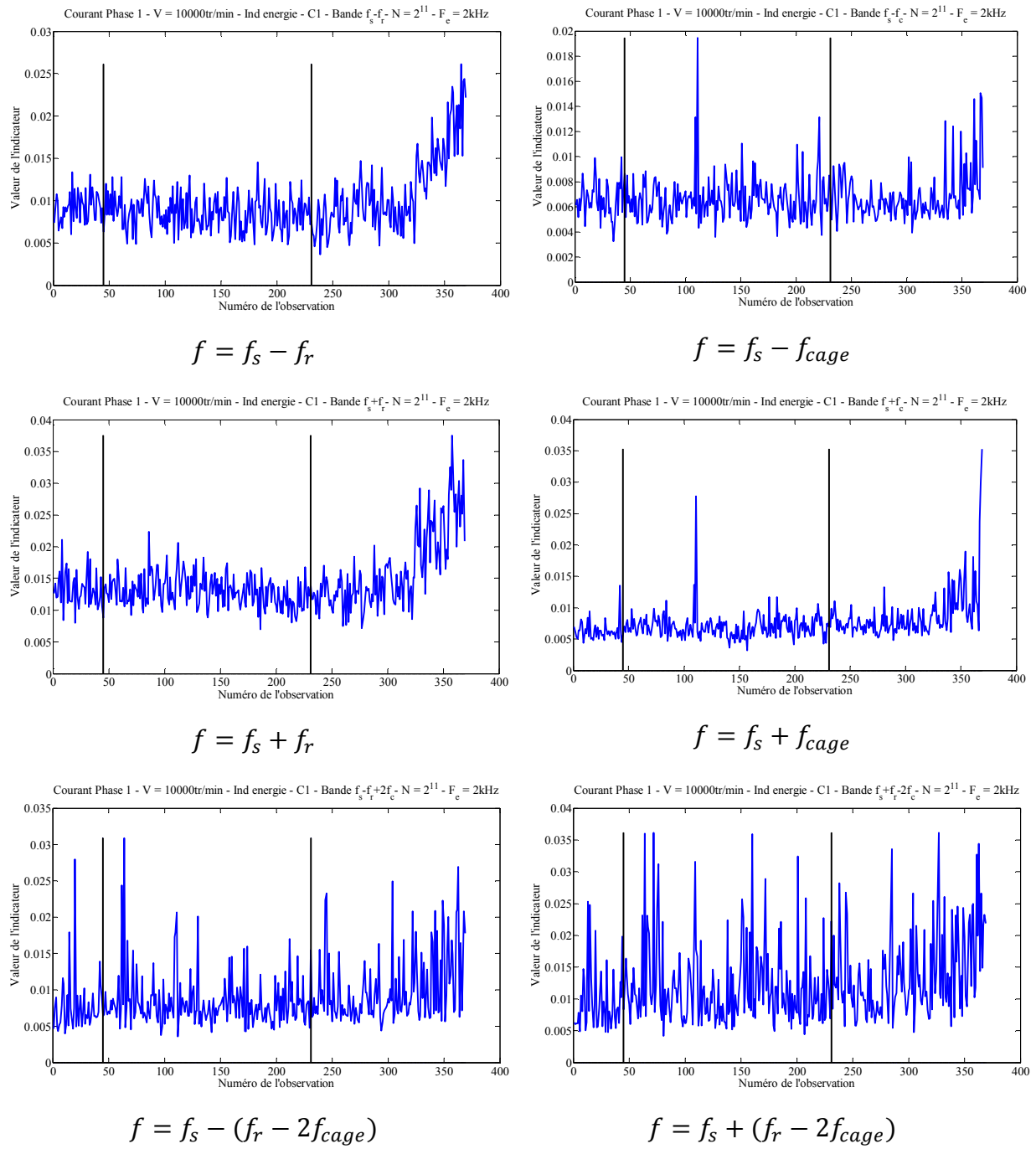


Figure 3-33 : Indicateur Energie pour $f = f_s \pm f_r$, $f = f_s \pm f_{cage}$ et $f = f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ - Signal courant statorique phase 1 à 10 000 tr/min

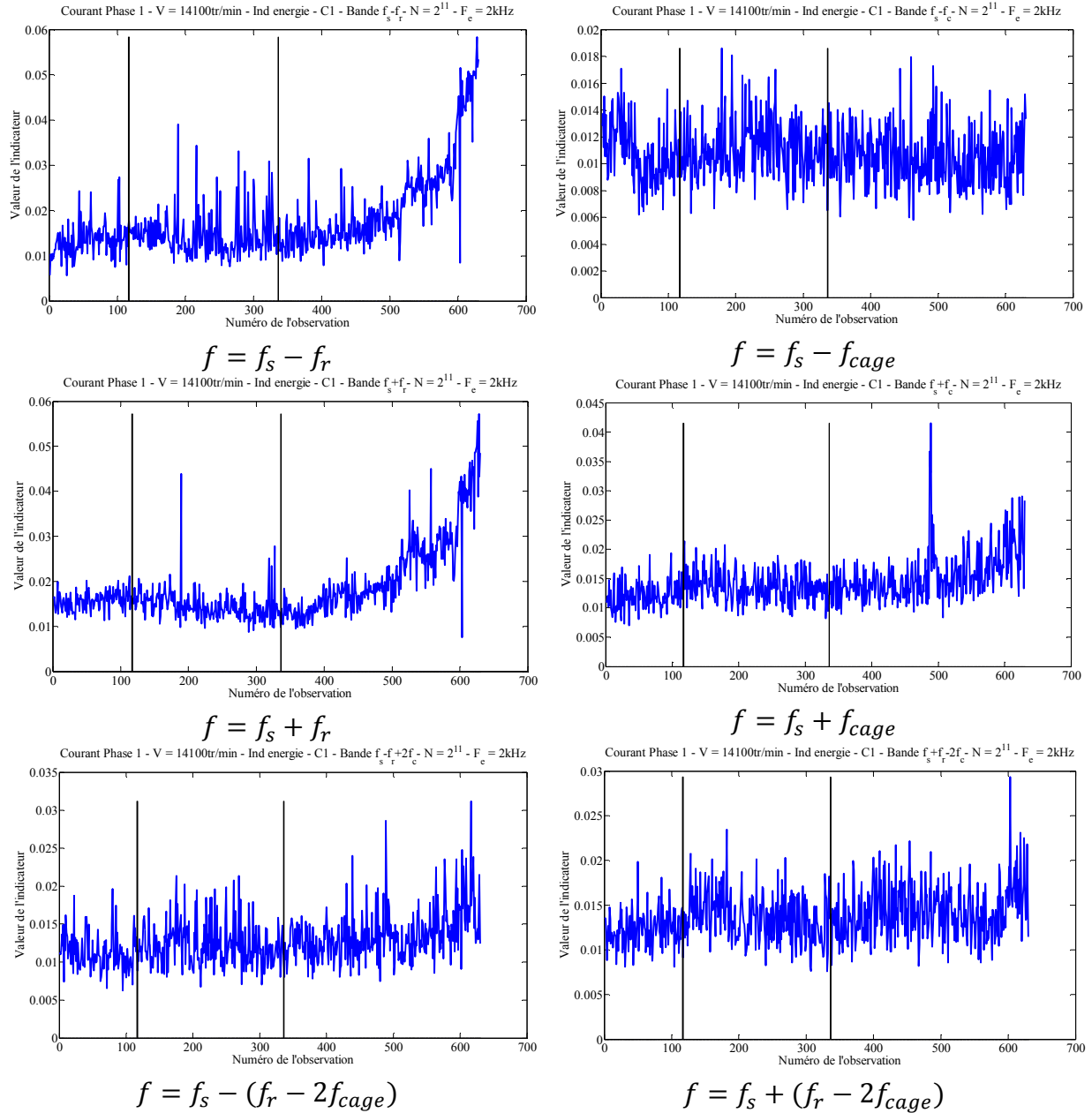


Figure 3-34 : Indicateur Energie pour $f = f_s \pm f_r$, $f = f_s \pm f_{cage}$ et $f = f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ - Signal courant statorique phase 1 à 14 100 tr/min

Conclusion sur les indicateurs d'énergie sur le spectre de courant statorique

De manière générale, nous constatons que les indicateurs exploitant les courants statoriques sont moins efficaces que ceux utilisant la vitesse ou la position. Les séparations cas sains /cas défaillants sont moins bonnes et les variances des indicateurs sont plus importantes. Comme nous l'avons constaté, les signatures des défaillances dans le spectre du courant statorique sont plus proches du niveau du bruit de plancher du spectre. La complexité harmonique et le faible niveau des signatures mécaniques dans le courant expliquent ces moins bons résultats. Les fréquences à surveiller les plus pertinentes sont $f_s \pm f_r$.

3.4.4 Indicateur d'énergie sur le spectre de courant onduleur

Comme nous avons déjà expliqué au paragraphe 2.6.3, les signatures qui apparaissent dans le spectre de la vitesse aux fréquences liées à f_{osc} (ici $f_r, f_{cage}, f_r - 2f_{cage}$) doivent apparaître sur le spectre de courant onduleur aux fréquences référencées dans le tableau 3-13. Nous avons remarqué dans les paragraphes 3.4.2 et 3.4.3 que les familles fréquentielles liées à l'harmonique $f_r - 2f_{cage}$ dans la vitesse n'étaient que très peu sensibles au défaut. Nous proposons donc de construire 2 indicateurs pour l'analyse du signal issu du courant onduleur :

- le premier exploite le spectre dans une bande fréquentielle centrée sur $6f_s \pm f_r$,
- le deuxième exploite le spectre dans une bande fréquentielle centrée sur $6f_s \pm f_{cage}$,

Puisque les signatures des défauts sur le spectre de courant onduleur sont liées à des fréquences autour de $6f_s$, la fréquence d'échantillonnage doit être augmentée par rapport à celle utilisée pour l'analyse des signaux précédents, afin de pouvoir surveiller ces harmoniques. En effet, à la vitesse 14 100 tr/min, la fréquence la plus élevée ciblée par les indicateurs est désormais $6f_s + f_r = 4465 \text{ Hz}$. D'après le théorème de Shannon, la fréquence d'échantillonnage doit être plus grande que deux fois la fréquence maximale désirée dans le spectre. Nous choisissons donc une fréquence d'échantillonnage de 10kHz, qui permet, pour toutes les vitesses, de couvrir les fréquences désirées tout en restant la plus faible possible en vue d'une implantation temps réel. Pour conserver la même excursion fréquentielle, ($\Delta f < 1\text{Hz}$), nous avons sélectionné une taille d'observation de $N = 2^{12}, 2^{13}$ points

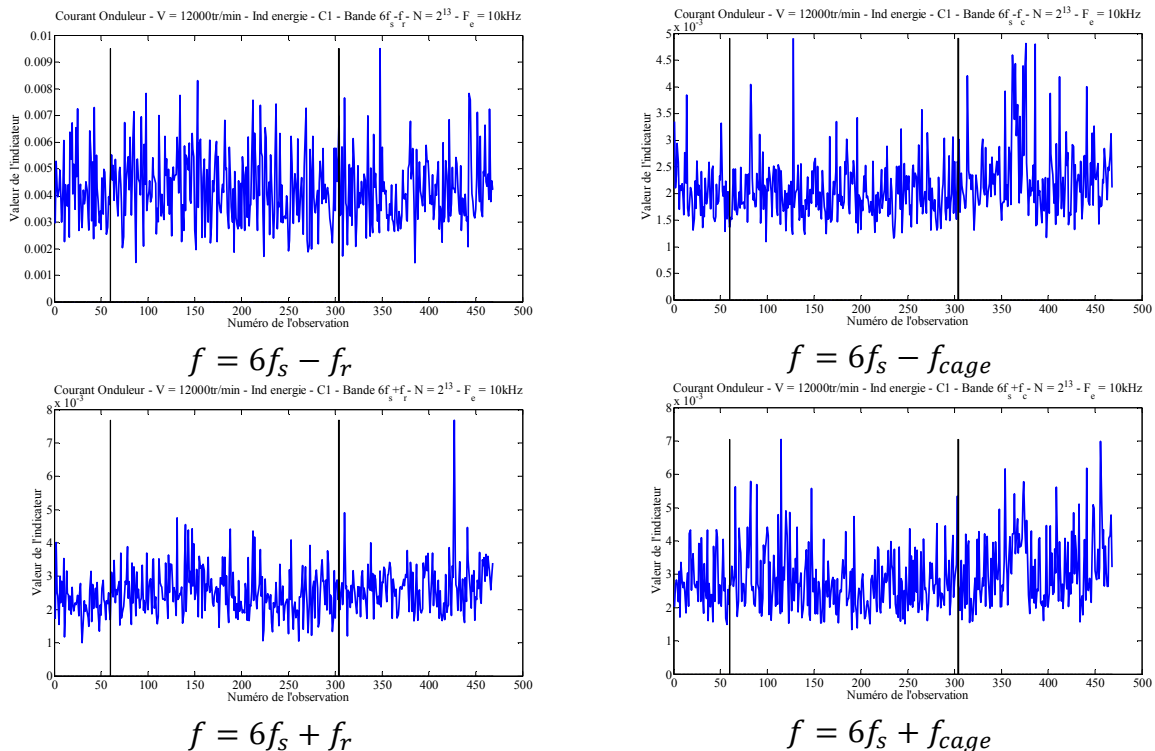
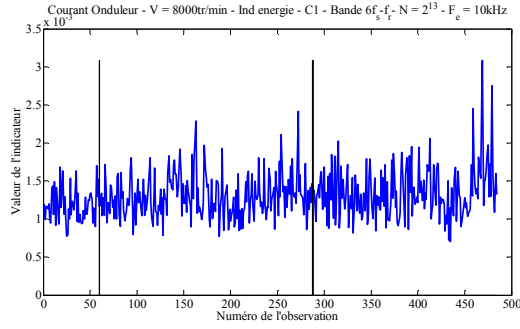
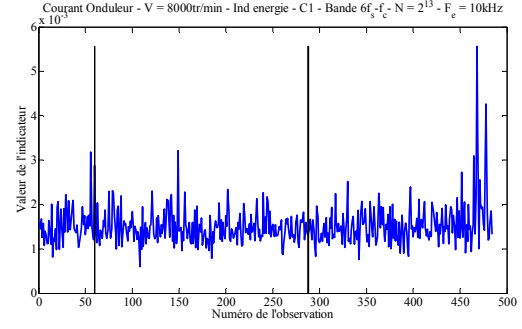


Figure 3-35 : Indicateur Energie pour $f = 6f_s \pm f_r$, $f = 6f_s \pm f_{cage}$ - Signal courant onduleur à 12 000 tr/min

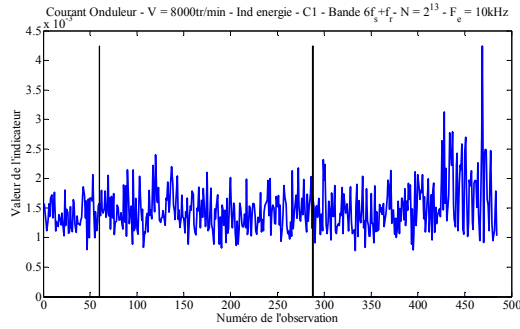
3.4 Construction des indicateurs énergétiques



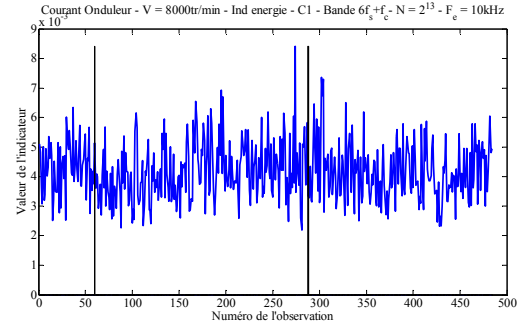
$$f = 6f_s - f_r$$



$$f = 6f_s - f_{cage}$$

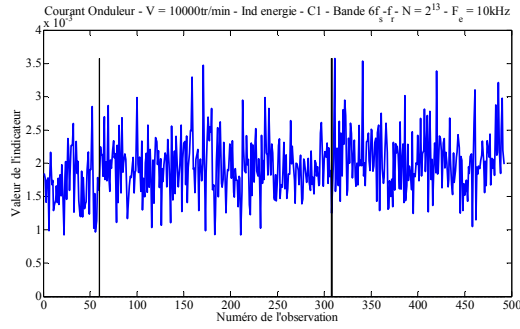


$$f = 6f_s + f_r$$

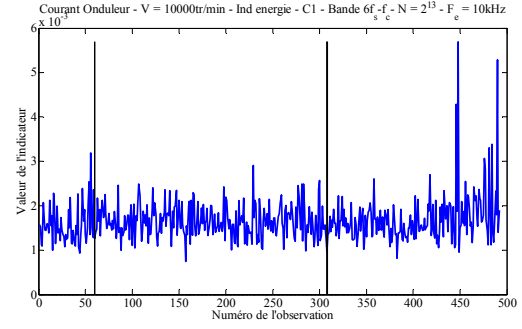


$$f = 6f_s + f_{cage}$$

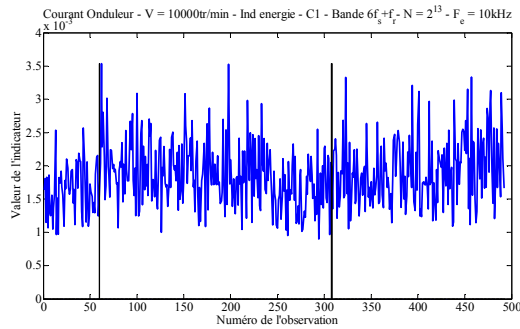
Figure 3-36 : Indicateur Energie pour $f = 6f_s \pm f_r$, $f = 6f_s \pm f_{cage}$ - Signal courant onduleur à 8000 tr/min



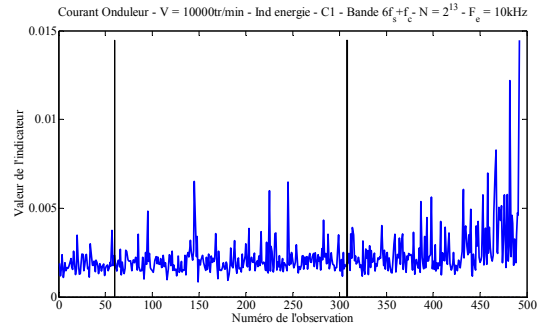
$$f = 6f_s - f_r$$



$$f = 6f_s - f_{cage}$$



$$f = 6f_s + f_r$$



$$f = 6f_s + f_{cage}$$

Figure 3-37 : Indicateur Energie pour $f = 6f_s \pm f_r$, $f = 6f_s \pm f_{cage}$ - Signal courant onduleur à 10 000 tr/min

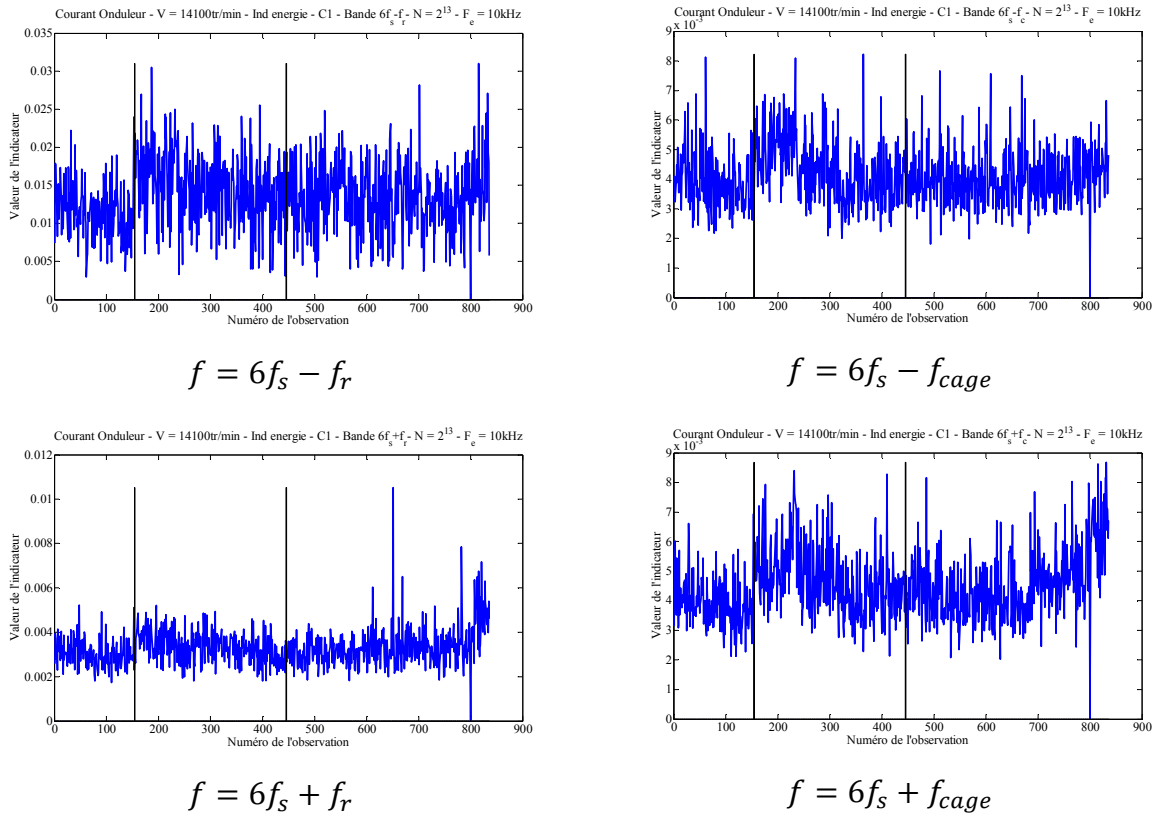


Figure 3-38 : Indicateur Energie pour $f = 6f_s \pm f_r$, $f = 6f_s \pm f_{cage}$ - Signal courant onduleur à 14 100 tr/min

Conclusion sur les indicateurs d'énergie sur le spectre de courant onduleur

De manière générale, nous constatons que les indicateurs exploitant les courants d'onduleur sont moins efficaces que ceux utilisant la vitesse, la position ou même le courant statorique : séparation sain/défaillant moins bonne, et variances des indicateurs plus importantes.

3.5 Critères de comparaison des indicateurs

Nous avons montré dans le paragraphe 3.4, les résultats obtenus avec les indicateurs énergétiques sur la campagne 1, pour les signaux vitesse, position, courant de phase et courant d'onduleur. Les données sont nombreuses et leur analyse n'a été réalisée que de manière qualitative. Ceci ne saurait suffire pour déterminer objectivement quelles sont les grandeurs les plus efficaces, la vitesse de rotation et les paramètres de réglage les mieux adaptées, ou encore les bandes de fréquences les plus pertinentes pour réaliser la détection. De plus, il serait intéressant de pouvoir comparer l'efficacité des indicateurs sur les deux campagnes d'essais pour s'assurer de la reproductibilité des résultats. Nous proposons donc d'introduire des critères de comparaison des indicateurs afin d'apporter des éléments qualitatifs chiffrés.

L'objectif est d'évaluer l'efficacité des indicateurs par rapport à différents critères de qualité. Pour comprendre la définition de chaque critère et la mesure de qualité qui y est associée, observons la figure 3-39 présentant l'indicateur énergétique évalué sur le spectre de position de la campagne N°1 pour la fréquence $f_s + f_c$ à la vitesse 12 000 tr/min.

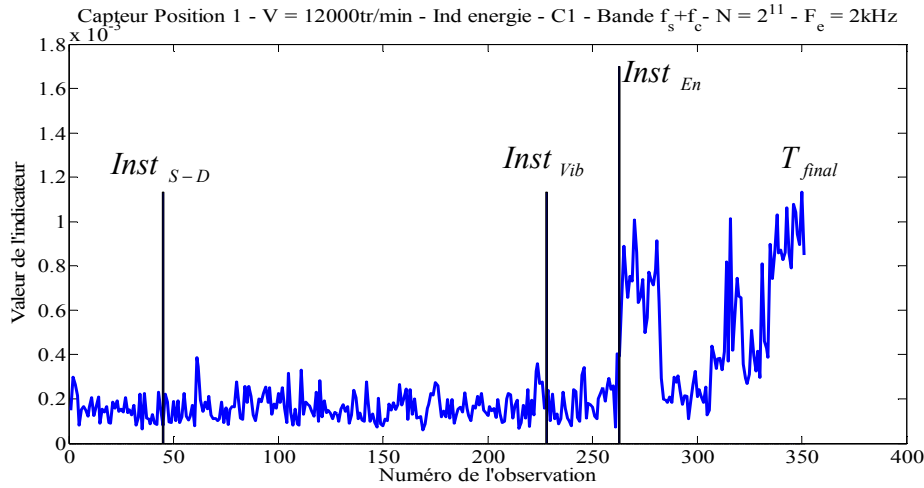


Figure 3-39 : Indicateur Energie - spectre de position - campagne 1- fréquence $f_s + f_c$ - 12 000 tr/min

Nous désignons par :

- $Inst_{S-D}$: numéro de l'observation correspondant au changement du roulement.
- $Inst_{Vib}$: numéro de l'observation où l'indicateur vibratoire a réagit.

La détermination de l'instant $Inst_{Vib}$ est réalisée à partir de l'expérience acquise par TECHNOFAN au cours des campagnes vibratoires précédant notre étude. Il a en effet été défini qu'un indicateur vibratoire calculé à partir du capteur de vibrations dépassant un seuil $Seuil_{Vib}$ égal à 5 fois la valeur en régime sain, permettait de conclure à un début de dégradation significatif pour le roulement. Il convient de rappeler que la fiabilité de tout nouveau dispositif doit-être avérée avant montage sur avion pour essais puis certification. Notre base de comparaison, sans doute imparfaite sera la détection issue des indicateurs vibratoires, pour laquelle l'expérience de Technofan est certaine. De plus, l'évaluation définie (temps mesurés) dépend aussi de la dégradation du roulement, qui risque de ne pas être identiques en régime de dégradation « naturelle ». Néanmoins, nous adopterons ces critères comme base de travail pour la suite de nos travaux, quitte à les adapter en vue d'une implantation temps réel et d'une évaluation des algorithmes de détection.

Pour calculer nos critères, il nous faut définir un seuil à partir duquel nous considérons que la détection est réalisée. Nous l'avons fixé à 2 fois la valeur moyenne de l'indicateur en sain (cette valeur étant calculée entre l'instant zéro et $Inst_{S-D}$). Le choix de cette valeur de seuil est bien évidemment arbitraire et discutable. Dans notre travail, le seuil a été déterminé après observation des différents indicateurs pour minimiser a priori le nombre de fausses alarmes.

$$seuil_{detection} = \frac{2}{Inst_{S-D}} \sum_{i=1}^{Inst_{S-D}} Indicateur(i) \quad (3-4)$$

L'imposition de ce seuil nous permet d'introduire :

- $Inst_{En}$: numéro de l'observation où l'indicateur énergétique a dépassé le seuil pour la première fois après $Inst_{Vib}$

3.5.1 Critère 1 : Rapidité de détection

Le critère « Rapidité de détection » mesure une image du temps écoulé entre l'instant où l'indicateur vibratoire dépasse le seuil critique $Seuil_{vib}$ et l'instant où notre indicateur franchit le seuil $seuil_{detection}$ imposé par l'équation (3-4). Le critère de rapidité est alors défini par :

$$C_{rapidité} = 100 \frac{T_{final} - Inst_{En}}{T_{final} - Inst_{vib}} \quad (3-5)$$

Ainsi, si l'indicateur étudié détecte le défaut au même instant que l'indicateur vibratoire, $C_{rapidité} = 100$. Au contraire, si l'indicateur étudié ne dépasse pas le seuil avant T_{final} , $C_{rapidité} = 0$.

3.5.2 Critère 2 : qualité de la séparation sain / défaillant

Ce critère mesure l'écart entre la valeur considérée saine de notre indicateur (avant le changement du roulement) et la valeur considérée défaillante, c'est-à-dire à partir de l'instant où le seuil de détection $seuil_{detection}$ est dépassé. Ce critère est construit en établissant le rapport entre la valeur moyenne en sain de l'indicateur et la valeur moyenne de l'indicateur calculée à partir de l'instant de détection $Inst_{En}$:

$$Ecart_{SD} = \frac{\frac{1}{Inst_{S-D}} \sum_{i=1}^{Inst_{S-D}} Indicateur(i)}{\frac{1}{T_{final} - Inst_{En}} \sum_{i=Inst_{En}}^{T_{final}} Indicateur(i)} \quad (3-6)$$

Pour avoir un critère exploitable quelque soit la grandeur étudiée, la bande de fréquences ou la vitesse de fonctionnement considérée, nous fixons qu'au-delà d'un rapport 5 entre les valeurs de l'indicateur pour les cas sain et défaillant, la détection est réalisée avec un critère de qualité de 100%. Le critère de qualité $C_{Ecart_{SD}}$ pour la séparation sain/défaillant s'exprime alors par :

$$C_{Ecart_{SD}} = 20 \times Ecart_{SD} \quad (3-7)$$

3.5.3 Critère 3 : Fiabilité de l'indicateur en cas défaillant

Une fois le défaut détecté par notre indicateur (à partir de l'instant $Inst_{En}$), ce critère calcule la qualité de continuité de la détection. C'est le pourcentage de points qui dépassent la valeur du seuil $seuil_{detection}$ à partir de l'instant de détection $Inst_{En}$. Ce critère est l'image du pourcentage de vraies alarmes, et traduit la capacité de l'indicateur à indiquer la présence du

défaut quand celui-ci est effectivement présent et le reste. Ainsi, si la valeur de l'indicateur redescend en-dessous du seuil après l'instant $Inst_{En}$, nous considérons que sa fiabilité est dégradée. Si l'indicateur reste en permanence au-dessus du seuil de détection après l'instant $Inst_{En}$, sa fiabilité est de 100%. Nous notons ce critère C_{fiab_VA} .

Calculer ce critère ss la forme d'un % est un peu trompeur, ce n'est peut-être pas comme ça en dégradation « naturelle », la durée entre détection et fin de vie est ss doute plus grande et le % donc plus grande.

3.5.4 Critère 4 : Fiabilité de l'indicateur en cas sain

Ce critère, noté C_{fiab_FA} , évalue la qualité de l'indicateur en termes de fausses alarmes. Il s'agit de déterminer si l'indicateur ne dépasse pas le seuil de détection avant l'instant de détection de l'indicateur vibratoire. Il calcule donc le pourcentage de points qui ne dépasse pas le seuil de détection avant l'instant $Inst_{Vib}$. Ainsi, si ce pourcentage de points est de 100%, cela signifie que notre indicateur ne dépasse jamais le seuil de détection entre les instants $Inst_{S-D}$ et $Inst_{Vib}$, donc qu'il ne génère aucune fausse alarme. Si plusieurs points franchissent le seuil pendant cette durée, cela signifie qu'un défaut est signalé alors que l'on considère l'équipement encore en cas sain. Le critère de qualité C_{fiab_FA} de l'indicateur est alors dégradé. Ce critère est particulièrement important pour l'équipementier, afin de ne pas générer des surcoûts.

3.5.5 Critère généralisé

Les quatre critères sont présentés sur la figure 3-40, pour l'exemple associé aux variations de l'indicateur de la figure 3-39, en utilisant la technique du RadarPlot. Chaque axe de cette représentation correspond à un des critères précédemment défini.

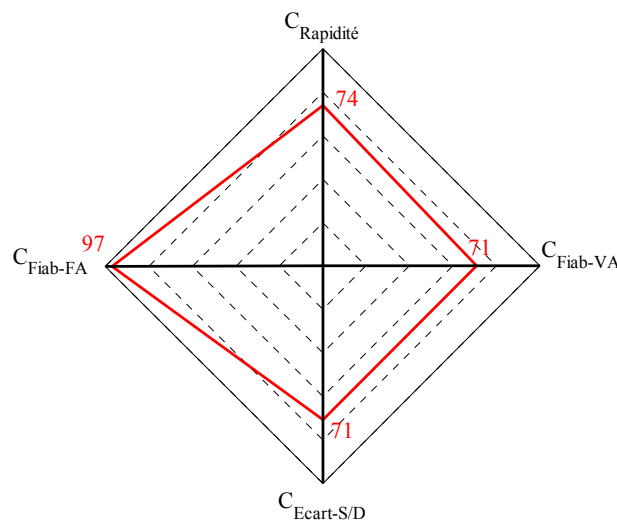


Figure 3-40 : RadarPlot des Critères évalué pour l'indicateur Energie - signal de position - campagne 1 - fréquence $f_s + f_c$ - 12 000 tr/min

De cette figure, nous pouvons déduire que :

- L'indicateur utilisé détecte le défaut avec une bonne rapidité ($C_{rapidité}=74\%$) comparé à l'indicateur vibratoire. Nous pouvons en effet observer sur la figure 3-39, que le seuil de détection $seuil_{detection}$ est franchi peu de temps après $Inst_{vib}$.
- Le critère $C_{Ecart_{SD}} = 71\%$, ce qui signifie que la valeur moyenne de l'indicateur en défaillant est 3.55 fois plus forte qu'en régime sain (100% correspondant à un rapport sain-défaillant de 5).
- Le critère $C_{fiab_{VA}}=71\%$, ce qui signifie que seulement 71% des valeurs de l'indicateur dépassent la valeur du seuil $seuil_{detection}$ alors que le défaut est toujours présent.
- Le critère $C_{fiab_{FA}}=97\%$, ce qui signifie que seulement 3% des valeurs de l'indicateur dépassent la valeur du seuil, entre le moment du changement du roulement et le moment de détection de défaut par l'indicateur vibratoire.

Finalement, pour établir un critère global rassemblant l'ensemble de ces informations, la surface du quadrilatère obtenu est calculée de telle sorte que si tous les axes sont à 100%, la valeur de $S_{Critère}$ soit égale à 100.

$$S_{Critère} = \frac{\sqrt{(C_{rapidité} + C_{Ecart_{SD}})(C_{fiab_{VA}} + C_{fiab_{FA}})}}{2} \quad (3-8)$$

3.5.6 Critère généralisé sur les indicateurs de vitesse

Nous présentons dans ce paragraphe les valeurs moyennes des critères de qualité évalués sur les indicateurs utilisant la vitesse mécanique. Les résultats sont donnés pour $N_p = 2^{11}$. La qualité de l'indicateur est globalement croissante avec le nombre de points choisi pour la FFT. Cependant, un nombre de points trop important ($N_p = 2^{12}$) n'apporte pas une amélioration forte des critères. Ainsi, après une étude de l'influence de la taille d'observation sur la qualité des indicateurs, les valeurs de $N_p = 2^{10}$ ou $N_p = 2^{11}$ semblent constituer un bon compromis entre la taille du vecteur à analyser et la qualité des résultats. Quelle que soit la vitesse et la bande fréquentielle considérée, le critère présentant la plus forte reproductibilité s'avère être $C_{fiab_{FA}}$. Les indicateurs construits, compte tenu du seuil choisi, présentent donc de très faibles probabilités de générer des fausses alarmes.

Le tableau 3-15 présente les valeurs moyennes du critère rapidité sur l'ensemble des indicateurs calculés sur les fréquences f_c , f_r et $f_r - 2f_c$ pour les deux campagnes d'essais et pour les différentes vitesses de fonctionnement, (cf tableau 3-16 pour le critère écart S/D, et tableau 3-17 pour le critère fiabilité VA. Le critère fiabilité FA est à 100% pour les deux campagnes et pour les différentes vitesses de fonctionnement.

Critère Rapidité	Campagne N°1	Campagne N°2
Vitesse 8 000 tr/min	55	18
Vitesse 10 000 tr/min	35	6
Vitesse 12 000 tr/min	46	1
Vitesse 14 100 tr/min	34	15

Tableau 3-15 : Valeur moyenne du critère Rapidité sur l'ensemble des indicateurs calculés sur les fréquences f_c , f_r et $f_r - 2f_c$, pour les deux campagnes d'essais et pour différentes vitesses de fonctionnement

Critère Ecart S/D	Campagne N°1	Campagne N°2
Vitesse 8 000 tr/min	33	82
Vitesse 10 000 tr/min	54	57
Vitesse 12 000 tr/min	48	64
Vitesse 14 100 tr/min	63	58

Tableau 3-16 : Valeur moyenne du critère Ecart S/D sur l'ensemble des indicateurs calculés sur les fréquences f_c , f_r et $f_r - 2f_c$, pour les deux campagnes d'essais et pour différentes vitesses de fonctionnement

Critère Fiabilité VA	Campagne N°1	Campagne N°2
Vitesse 8 000 tr/min	21	88
Vitesse 10 000 tr/min	63	57
Vitesse 12 000 tr/min	50	88
Vitesse 14 100 tr/min	75	59

Tableau 3-17 : Valeur moyenne du critère Fiabilité VA sur l'ensemble des indicateurs calculés sur les fréquences f_c , f_r et $f_r - 2f_c$ pour les deux campagnes d'essais et pour différentes vitesses de fonctionnement

Nous constatons que le critère $C_{rapidité}$ est celui qui présente les moins bonnes performances, surtout pour la campagne N°2. Cela ne signifie pas que l'indicateur ne détecte pas les défauts mais que ses performances en rapidité de détection sont moindres que les performances que l'on obtiendrait avec l'utilisation de l'indicateur vibratoire.

En terme de séparation entre sain et défaillant, nous remarquons que le critère présente les meilleurs résultats dans la campagne N°1 à la vitesse 14 100 tr/min et dans la campagne N°2 à

la vitesse 8 000 tr/min. Cette conclusion est cohérente avec les dates des enregistrements des deux campagnes. En effet, les derniers enregistrements faits dans la campagne N°1 ont été réalisés pour une vitesse de 14 100 tr/min, et dans la campagne N°2 à 8000 tr/min. Ces enregistrements sont donc logiquement ceux pour lesquelles l'état de dégradation du roulement est le plus avancé, d'où les valeurs élevées prises par l'indicateur et par le critère de séparation.

Le critère C_{fiab_VA} montre également de bonnes performances des indicateurs pour tous les cas considérés (notons tout de même une valeur faible pour 8000 tr/min dans la campagne N°1), et surtout pour les vitesses 14 100 tr/min (campagne N°1) et 8 000 tr/min (campagne N°2).

Observons maintenant les critères de qualité dans le cas de détection par bandes fréquentielles. Le tableau 3-18 montre les valeurs moyennes des différents critères sur l'ensemble des indicateurs calculés sur les différentes vitesses de fonctionnement, pour les harmoniques f_c , f_r et $f_r - 2f_c$ et pour les deux campagnes d'essais.

Nous remarquons sur ce tableau que les valeurs des critères les plus importantes se situent pour la fréquence f_c pour la campagne N°1, et pour la fréquence f_r pour la campagne N°2. Ces résultats sont cohérents avec les informations fournies par les indicateurs vibratoires qui montrent que la dégradation des roulements ne s'est certainement pas produite de la même manière dans les deux cas, ce qui est assez représentatif de la réalité d'un équipement.

Les critères obtenus à la fréquence $f_r - 2f_c$ présentent, pour certains cas, des valeurs intéressantes, surtout pour la campagne N°1.

		f_c	f_r	$f_r - 2f_c$
Campagne 1	Critère Rapidité	53,25	30	44,5
	Critère Ecart S/D	57,25	42,75	48,75
	Critère Fiabilité VA	68,5	47,25	41,25
	Critère Fiabilité FA	100	100	100
Campagne 2	Critère Rapidité	10,75	10,75	9,25
	Critère Ecart S/D	53,25	97,5	45,5
	Critère Fiabilité VA	81	83	54,75
	Critère Fiabilité FA	100	100	100

Tableau 3-18 : Valeur moyenne des critères intermédiaires sur l'ensemble des indicateurs calculés pour les différentes vitesses de fonctionnement, pour les harmoniques f_c , f_r et $f_r - 2f_c$, et pour les deux campagnes d'essais

Finalement, le tableau 3-19 montre les valeurs des critères généralisés appliqués sur le signal de vitesse pour les différentes vitesses de fonctionnement, pour les deux campagnes d'essais, et pour les différentes bandes de fréquences sélectionnées.

		f_c	f_r	$f_r - 2f_c$	Moyenne par vitesse
Campagne N°1	8000 tr/min	54	47	47	49,33
	10 000 tr/min	63	52	60	58,33
	12 000 tr/min	68	53	53	58
	14 100 tr/min	72	56	65	64,33
Moyennes campagne N°1		64,25	52	56,25	
Campagne N°2	8000 tr/min	61	76	62	66,33
	10 000 tr/min	42	74	22	46
	12 000 tr/min	51	67	43	53,67
	14 100 tr/min	46	69	41	52
Moyennes campagne N°2		50	71,5	42	

Tableau 3-19 : Critère généralisé – Signal vitesse – $N = 2^{11}$

L'analyse des critères généralisés confirme les résultats obtenus sur les différents critères intermédiaires. En effet, nous constatons que, de manière moyenne, la bande ciblée sur f_c présente la meilleure efficacité pour la campagne N°1 et la bande ciblée sur f_r présente la meilleure efficacité pour la deuxième campagne N°2. Nous constatons également, pour les critères généralisés, que les meilleures valeurs obtenues correspondent à une vitesse de fonctionnement de 14 100 tr/min pour la campagne N°1, et à 8 000 tr/min pour la campagne N°2. La valeur des critères généralisés est relativement homogène pour les différentes vitesses de rotation. Ainsi, à ce stade de l'étude, aucune vitesse ne semble préférable pour réaliser la détection, ce qui pourrait en effet être envisagé.

3.5.7 Critère généralisé sur les indicateurs de position

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats des critères généralisés obtenus par analyse du signal position. Les critères partiels ne sont plus présentés. Nous supposons, ce qui a été vérifié pour la plupart des cas, que les critères généralisés agglomèrent de manière fidèle les informations contenues dans les différents critères intermédiaires.

Le tableau 3-20 montre les valeurs des critères généralisés appliqués sur le signal de position pour les différentes vitesses de fonctionnement, pour les deux campagnes d'essais, et pour les différentes fréquences sélectionnées.

		$f_s + f_c$	$f_s - f_c$	$f_s + f_r$	$f_s - f_r$	$f_s + (f_r - 2f_c)$	$f_s - (f_r - 2f_c)$	Moyenne par vitesse
Campagne N°1	8000 tr/min	42	21	51	53	39	53	43
	10 000 tr/min	22	68	54	53	56	58	52
	12 000 tr/min	78	78	56	57	26	39	56
	14 100 tr/min	79	87	57	60	24	47	59
	Moyennes campagne N°1	55	64	55	56	36	49	
Campagne N°2	8000 tr/min	57	57	76	76	48	57	62
	10 000 tr/min	50	58	73	73	52	52	60
	12 000 tr/min	49	54	61	60	51	59	56
	14 100 tr/min	66	52	57	55	45	47	54
	Moyennes campagne N°2	56	55	67	66	49	54	

Tableau 3-20 : Critère généralisé – Signal position – $N = 2^{11}$

Nous remarquons sur ce tableau que la valeur moyenne par vitesse du critère généralisé est la meilleure à 14 100 tr/min pour la campagne N°1 et 8 000 tr/min pour la campagne N°2. Ceci, rappelons-le, est cohérent avec les dates des enregistrements et la fin de la vie du roulement.

En termes de fiabilité par bande de fréquence, nous remarquons que les meilleures valeurs du critère généralisé sont obtenues pour la fréquence $f_s - f_c$ pour la campagne N°1, et à $f_s \pm f_r$ pour la campagne N°2. Plus généralement, les critères obtenus pour les bandes à $f_s \pm f_c$ et à $f_s \pm f_r$ présentent des valeurs plus importantes que les bandes autour de $f_s \pm (f_r - 2f_c)$.

3.5.8 Critère généralisé sur les indicateurs de courant statorique

De la même manière, nous présentons dans ce paragraphe les résultats des critères généralisés obtenus par analyse du signal courant statorique. Le tableau 3-21 montre les valeurs des critères généralisés appliqués sur le signal courant statorique pour les différentes vitesses de fonctionnement, pour les deux campagnes d'essais, et pour les différentes fréquences sélectionnées.

		$f_s + f_c$	$f_s - f_c$	$f_s + f_r$	$f_s - f_r$	$f_s + (f_r - 2f_c)$	$f_s - (f_r - 2f_c)$	Moyenne par vitesse
Campagne N°1	8000 tr/min	38	43	44	42	57	42	44
	10 000 tr/min	45	26	47	49	44	41	42
	12 000 tr/min	49	21	56	41	25	26	36
	14 100 tr/min	45	25	56	59	22	23	38
Moyennes campagne N°1		44	29	51	48	37	33	
Campagne N°2	8000 tr/min	53	49	76	67	59	54	60
	10 000 tr/min	49	41	73	74	54	49	57
	12 000 tr/min	0	0	0	0	0	0	0
	14 100 tr/min	33	33	54	59	25	18	37
Moyennes campagne N°2		34	31	51	50	35	30	

Tableau 3-21 : Critère généralisé – Signal courant statorique – $N = 2^{11}$

Nous remarquons que les bandes fréquentielles conduisant aux meilleures valeurs du critère généralisé sont celles à $f_s \pm f_r$ pour les deux campagnes d'essai. La valeur moyenne par vitesse du critère est toujours la plus importante à 8 000 tr/min pour la campagne N°2, mais elle ne l'est plus à 14 100 tr/min pour la campagne N°1. Si nous choisissons de construire l'indicateur seulement dans la bande $f_s \pm f_r$, nous retrouvons une valeur maximale du critère généralisé pour 14 100 tr/min pour la campagne N°1.

Nous remarquons également que les valeurs des critères à 12 000 tr/min pour la campagne N°2 sont tous à zéro. Les valeurs intermédiaires des critères pour ce cas sont aussi à zéro sauf le critère de fiabilité FA qui est à 100%. Les variations de l'indicateur sont pour ce cas inexistantes et il est donc impossible de détecter un changement d'amplitude des harmoniques. Ceci reste cohérent si l'on se repère à l'horodatage des enregistrements puisque, les derniers enregistrements réalisés à 12 000 tr/min pour la campagne N°2 datent de deux jours avant la « mort » du roulement.

En général, nous remarquons que les résultats obtenus avec l'indicateur énergétique sur le courant statorique sont moins bons que ceux obtenus avec les signaux vitesse et position.

3.5.9 Critère généralisé sur les indicateurs de courant onduleur

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats des critères généralisés obtenus par analyse du signal courant onduleur. Le tableau 3-22 montre les valeurs des critères généralisés appliqués sur le signal courant onduleur pour les différentes vitesses de fonctionnement, pour les deux campagnes d'essais, et pour différentes fréquences sélectionnées. Rappelons que pour le signal courant onduleur, nous avons choisi une taille d'observation de 2^{13} points et une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz.

Pour la campagne N°1, la valeur du critère ne dépasse jamais 50%. Pour la campagne N°2, nous obtenons généralement des meilleures valeurs pour les critères, mais les performances sont globalement beaucoup moins bonnes qu'avec la vitesse et la position. La famille à $6f_s \pm f_r$ est la plus significative en terme de qualité de détection.

		$6f_s + f_r$	$6f_s - f_r$	$6f_s + f_c$	$6f_s - f_c$	Moyenne par vitesse
Campagne N°1	8000 tr/min	19	24	24	21	22
	10 000 tr/min	22	24	48	24	29
	12 000 tr/min	27	22	24	23	24
	14 100 tr/min	28	16	29	25	24
Moyennes campagne N°1		24	21	31	23	
Campagne N°2	8000 tr/min	56	69	30	27	46
	10 000 tr/min	52	59	47	57	54
	12 000 tr/min	63	31	30	56	45
	14 100 tr/min	37	29	29	34	32
Moyennes campagne N°2		52	47	34	44	

Tableau 3-22 : Critère généralisé – Signal courant onduleur – $N = 2^{13}$

3.6 Conclusion sur les indicateurs énergétiques

Le tableau 3-23 montre un récapitulatif des critères généralisés pour les différents signaux étudiés. N'étant pas suffisamment significatifs, nous avons supprimés les critères obtenus sur les bandes $f_s \pm (f_r - 2f_c)$ sur les signaux position et courant.

		vitesse			Position				Courant de phase				Courant onduleur			
		f_c	f_r	$f_r - 2f_c$	$f_s - f_c$	$f_s + f_c$	$f_s - f_r$	$f_s + f_r$	$f_s - f_c$	$f_s + f_c$	$f_s - f_r$	$f_s + f_r$	$6f_s + f_r$	$6f_s - f_r$	$6f_s + f_c$	$6f_s - f_c$
Campagne N°1	8K	54	47	47	42	21	51	53	38	43	44	42	19	24	24	21
	10 K	63	52	60	22	68	54	53	45	26	47	49	22	24	48	24
	12 K	68	53	53	78	78	56	57	49	21	56	41	27	22	24	23
	14 K	72	56	65	79	87	57	60	45	25	56	59	28	16	29	25
Campagne N°2	8K	61	76	62	57	57	76	76	53	49	76	67	56	69	30	27
	10 K	42	74	22	50	58	73	73	49	41	73	74	52	59	47	57
	12 K	51	67	43	49	54	61	60	0	0	0	0	63	31	30	56
	14 K	46	69	41	66	52	57	55	33	33	54	59	37	29	29	34

Tableau 3-23 : Critère généralisé pour les différents signaux étudiés

Sur ce tableau, nous avons surligné les valeurs des critères qui dépassent 50%. Le tableau 3-24 montre les différentes bandes de fréquence qui présentent les meilleures valeurs des critères. De manière générale, les critères montrent nettement que les indicateurs construits sur les signaux vitesse et position sont plus performants que ceux construits sur le signal courant statorique et le courant onduleur. Plus la prise d'information s'éloigne de la source générant les phénomènes précurseurs du défaut, plus l'extraction de l'information devient complexe et perd son efficacité.

Signal étudié	Bande fréquentielle sélectionnée
Vitesse	f_c (campagne N°1) et f_r (campagne N°2)
Position	$f_s \pm f_r$ et $f_s \pm f_c$
Courant statorique	$f_s \pm f_r$
Courant onduleur	$6f_s \pm f_r$

Tableau 3-24 : Bandes fréquentielles présentant les meilleures valeurs des critères

3.7 Signatures supplémentaires détectées

En plus des harmoniques liées au défaut de roulements, nous avons remarqué dans le spectre du courant statorique, vers la fin de la campagne d'essai N°1, l'apparition d'harmoniques additionnels ne répondant pas aux compositions harmoniques déjà mis en évidence. Nous montrons, sur la figure 3-41 et la figure 3-42, le spectre du courant statorique dans l'intervalle $[0,2]$ kHz pour les vitesses 14 100 tr/min et 10 000 tr/min.

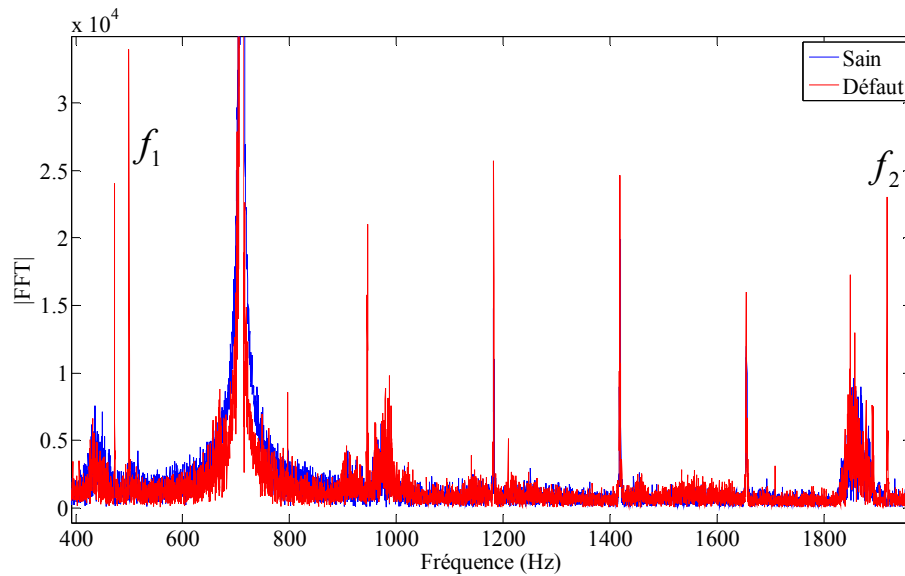


Figure 3-41 : Spectre du courant statorique à 14 100 tr/min

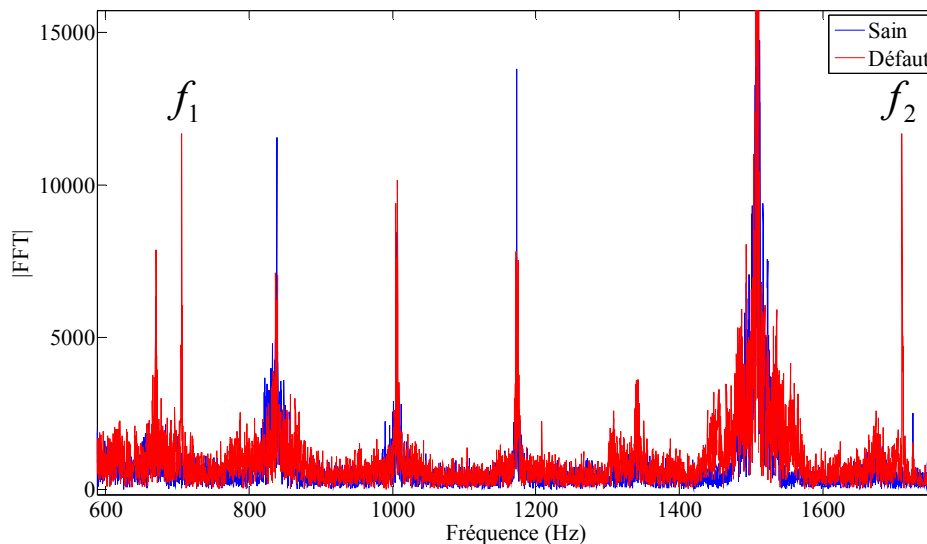


Figure 3-42 : Spectre du courant statorique à 10 000 tr/min

Les harmoniques additionnels évoqués sont notés f_1 et f_2 et sont situés respectivement à :

- $f_1 = 500 \text{ Hz}$, $f_2 = 1918 \text{ Hz}$ pour 14 100 tr/min
- $f_1 = 705 \text{ Hz}$, $f_2 = 1711 \text{ Hz}$ pour 10 000 tr/min.

En observant au même instant le spectre du courant de bus (cf figure 3-43), nous remarquons l'apparition d'une composante harmonique forte à $f_{bus} = 1208 \text{ Hz}$. Cette composante est totalement indépendante de la vitesse de rotation de la machine puisque sa fréquence reste fixe quelle que soit cette vitesse.

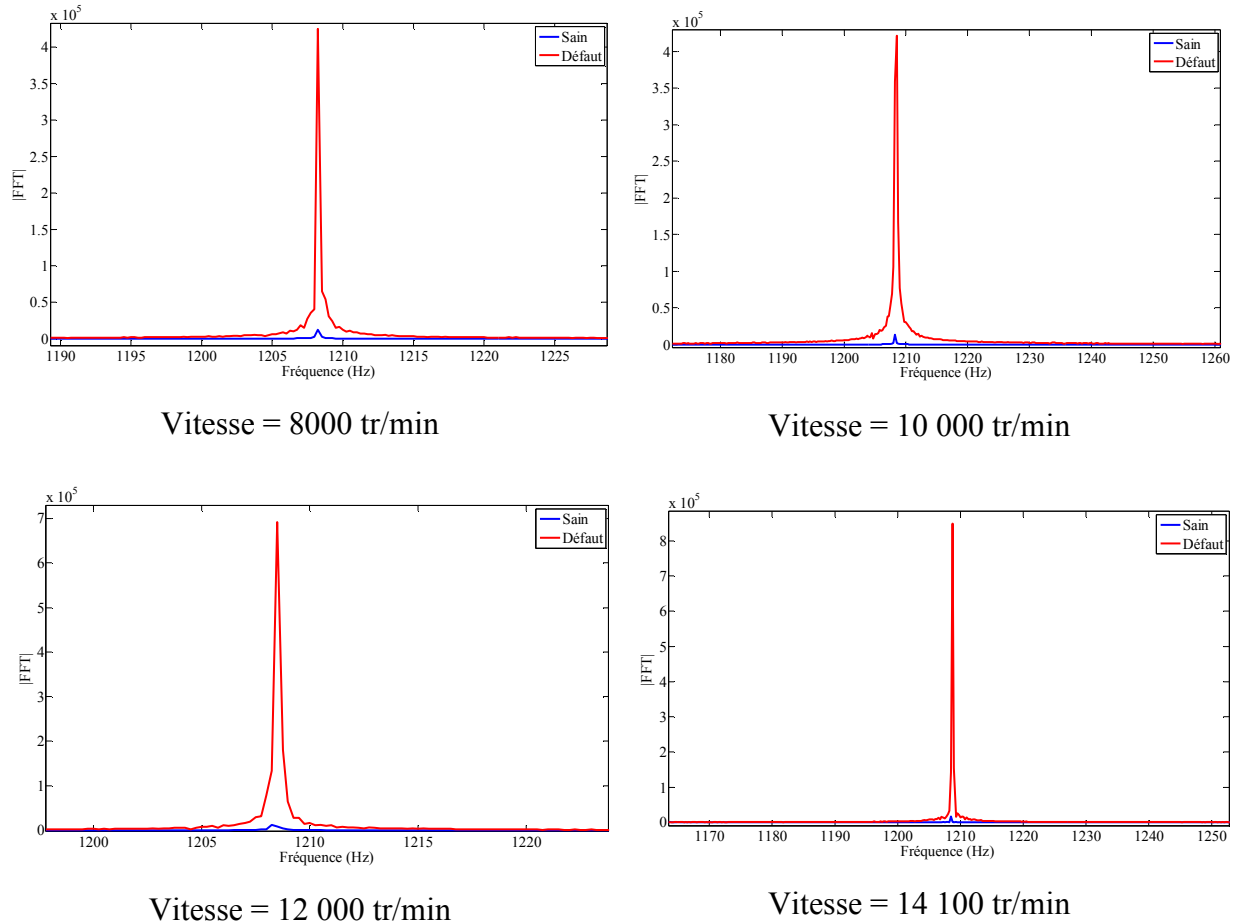


Figure 3-43 : Spectre courant de bus à la fréquence 1208 Hz pour les différentes vitesses de fonctionnement

Nous remarquons que :

- à la vitesse 14 100 tr/min : $f_{bus} - f_1 = 708 \text{ Hz} \cong f_s$ et $f_2 - f_{bus} = 708 \text{ Hz} \cong f_s$
- à la vitesse 10 000 tr/min : $f_{bus} - f_1 = 503 \text{ Hz} \cong f_s$ et $f_2 - f_{bus} = 503 \text{ Hz} \cong f_s$

Par déduction nous pouvons écrire :

$$f_{bus} = f_i \pm f_s \rightarrow f_{1,2} = f_{bus} \pm f_s \quad (3-9)$$

Nous montrons, dans le tableau 3-25, les valeurs des fréquences de la famille $f_{1,2}$ pour les différentes vitesses de fonctionnement.

	8000 tr/min	10000 tr/min	12000 tr/min	14100 tr/min
f_1	808 Hz	708 Hz	608 Hz	503 Hz
f_2	1608 Hz	1708 Hz	1808 Hz	1913 Hz

Tableau 3-25 : Famille $f_{1,2}$ pour différentes vitesses de fonctionnement

Nous remarquons, dans ce tableau, que les fréquences $f_{1,2}$ se confondent avec des harmoniques déjà présents dans le spectre du courant de phase pour les vitesses 8000 et 12 000 tr/min (multiple de f_s), d'où la difficulté de les observer pour ces vitesses malgré la présence dans le spectre du courant de bus de l'harmonique à $f_{bus}=1208$ Hz. L'origine de cette harmonique peut être reliée à la fréquence du réseau ($f_{réseau}=400$ Hz) alimentant l'équipement. Le redresseur de l'étage continue d'alimentation est un redresseur 12 pulses faisant normalement apparaître des variations à la fréquence $6f_{réseau}$. En cas de défaillance de cet étage, il est possible d'obtenir des variations à la fréquences $3f_{réseau} \approx 1208$ Hz $\approx 3 \times 400$ Hz. Nous montrons sur la figure 3-44 la présence de l'harmonique à $3f_{réseau}$ pour un redresseur défaillant (simulation sur PSIM d'un redresseur non équilibré).

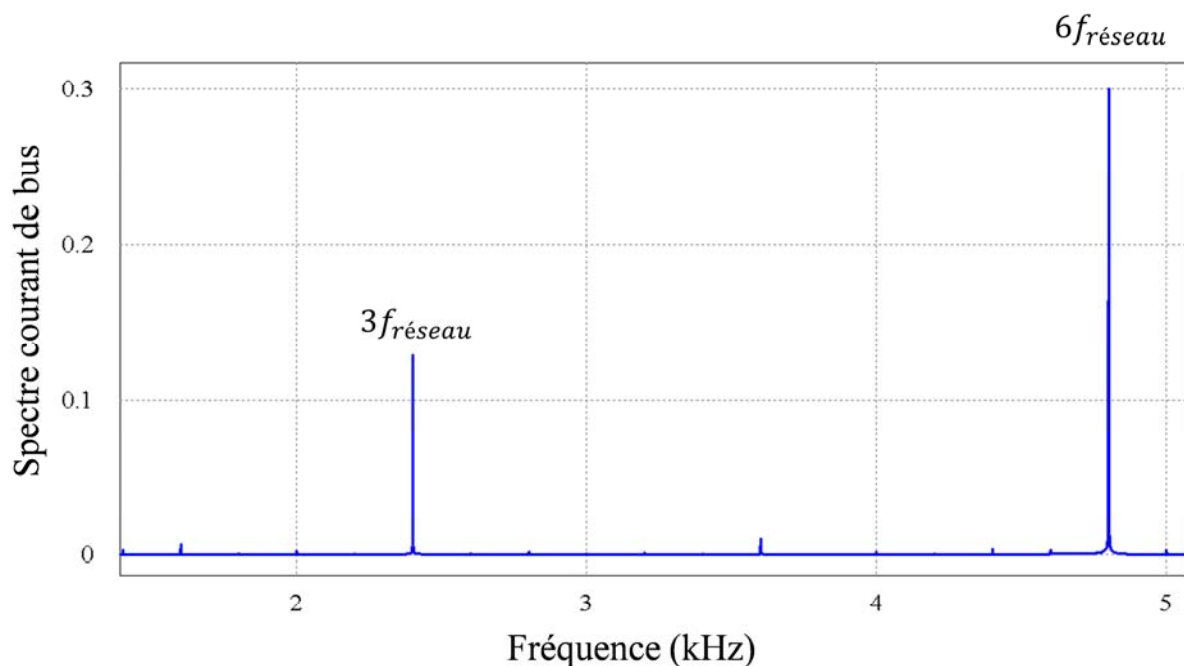


Figure 3-44 : spectre de courant de bus pour un redresseur défaillant

Or, il s'avère qu'à la fin de la campagne 1, après démontage de l'équipement, les techniciens ont pu constater un problème électrique survenu sur l'une des selfs de l'étage d'entrée (fil dessoudé). L'apparition des fréquences à $3f_{réseau}$ dans le courant de bus et à $3f_{réseau} \pm f_s$ dans le courant de phase peuvent donc s'expliquer par cette défaillance électrique.

3.8 Indicateur de défaut lié au problème électrique

Afin d'affiner les observations précédentes, nous proposons de construire un indicateur de défauts, ciblé sur des fréquences faisant intervenir la fréquence de réseau, sur les grandeurs électriques suivantes : courant statorique, courant de bus et courant onduleur. La figure 3-45 montre l'indicateur énergétique appliqué au signal courant de bus pour la fréquence $3f_{réseau}$ pour les différentes vitesses de fonctionnements.

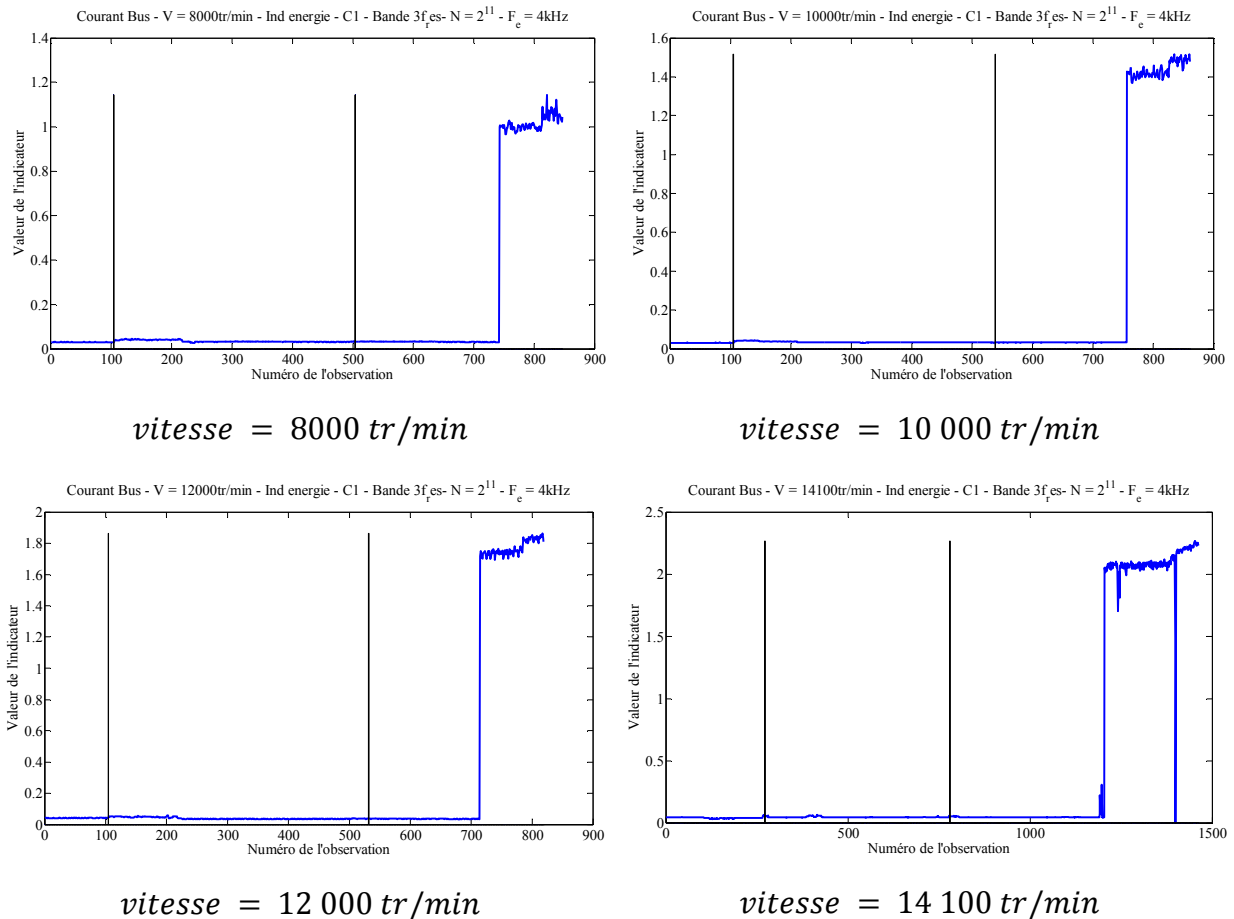
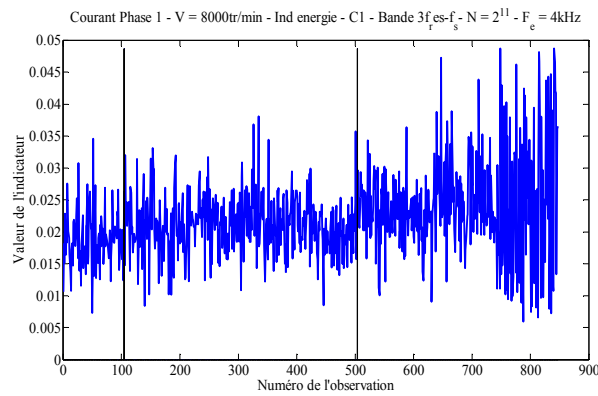
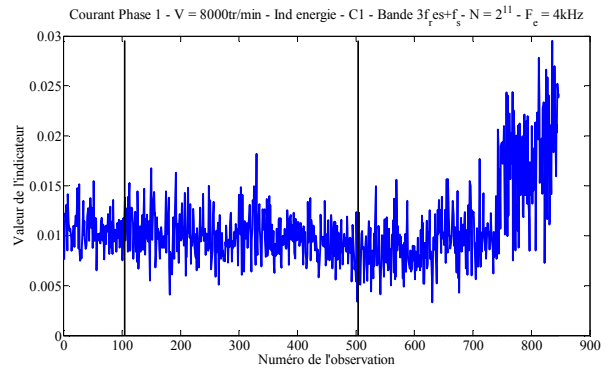


Figure 3-45 : Indicateur énergétique sur le signal courant de bus pour la fréquence $3f_{réseau}$ pour différentes vitesses de fonctionnement

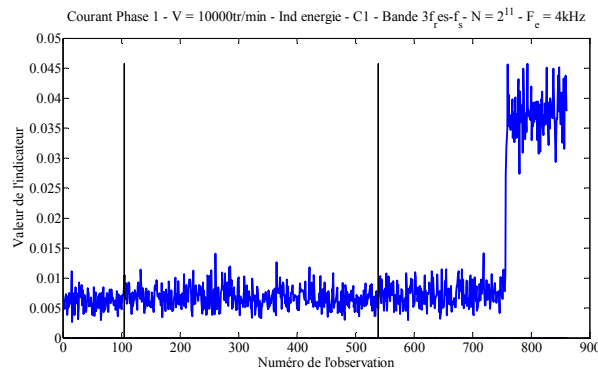
Nous remarquons que l'indicateur réagit uniquement à la fin de la campagne, témoignant bien de l'apparition d'un événement entraînant l'apparition d'harmoniques de forte amplitude à $3f_{réseau}$. Il semble donc possible de détecter également les défauts électriques de l'étage d'entrée par l'utilisation d'un indicateur énergétique. Puisque le défaut électrique apparaît dans le courant de bus à la fréquence $3f_{réseau}$, son image dans le spectre de courant statorique sera obtenue par une modulation à f_s . Ainsi, sur la figure 3-46, nous montrons l'indicateur énergétique appliqué au signal courant statorique aux fréquences $3f_{rés} \pm f_s$.



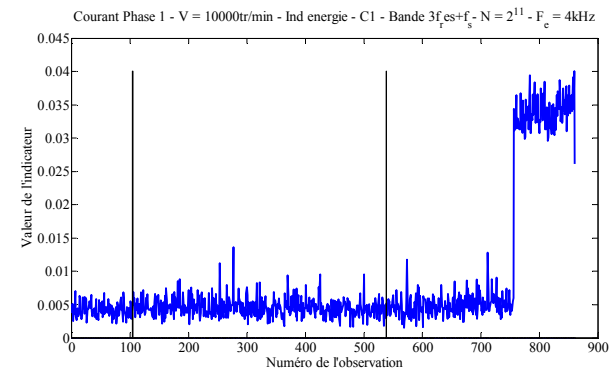
$$vitesse = 8000 \text{ tr/min}, 3f_{rés} - f_s$$



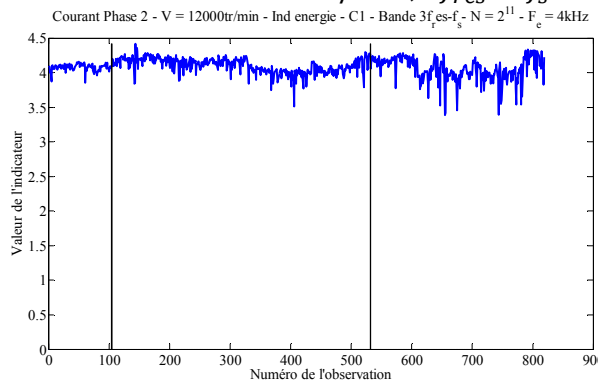
$$vitesse = 8000 \text{ tr/min}, 3f_{rés} + f_s$$



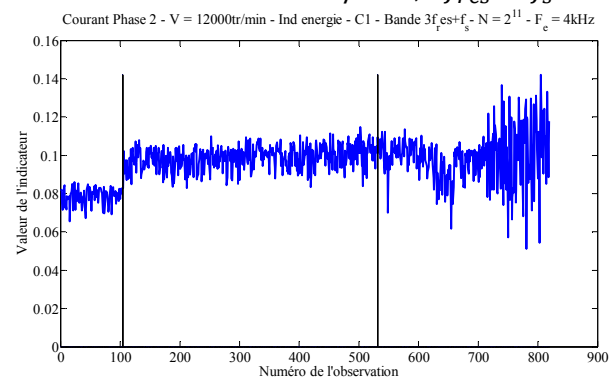
$$vitesse = 10\,000 \text{ tr/min}, 3f_{rés} - f_s$$



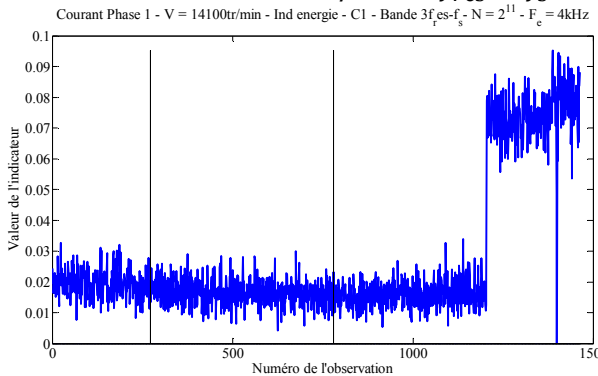
$$vitesse = 10\,000 \text{ tr/min}, 3f_{rés} + f_s$$



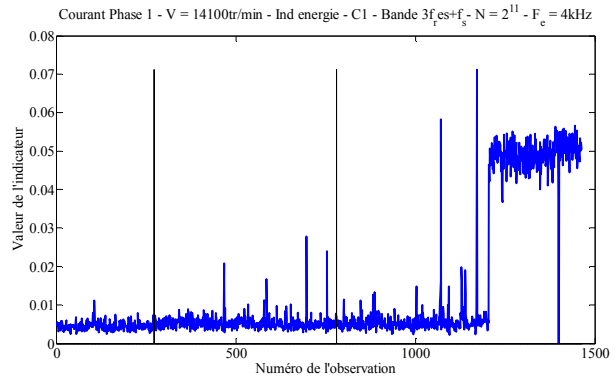
$$vitesse = 12\,000 \text{ tr/min}, 3f_{rés} - f_s$$



$$vitesse = 12\,000 \text{ tr/min}, 3f_{rés} + f_s$$



$$vitesse = 14\,100 \text{ tr/min}, 3f_{rés} - f_s$$



$$vitesse = 14\,100 \text{ tr/min}, 3f_{rés} + f_s$$

Figure 3-46 : Indicateur énergétique sur le signal courant statorique pour les fréquences $3f_{réseau} \pm f_s$ pour différentes vitesses de fonctionnement

Nous remarquons que l'indicateur réagit bien à la présence du défaut électrique pour les vitesses 10 000 tr/min et 14100 tr/min, mais ne réagit pas de la même manière pour les vitesses 8000 tr/min et 12 000 tr/min. Comme nous l'avons déjà évoqué, pour ces deux vitesses, les harmoniques à $3f_{réseau} \pm f_s$ se confondent avec des multiples de la fréquence statorique qui sont déjà présent dans le spectre de courant statorique.

Enfin, la figure 3-47 montre l'indicateur énergétique appliqué au signal courant onduleur à la fréquence $3f_{réseau}$, pour les différentes vitesses de fonctionnement. Nous remarquons sur cette figure que l'indicateur réagit, vers la fin de la campagne, à la présence du défaut électrique pour les vitesses 10 000 tr/min et 14 100 tr/min seulement, puisque pour les vitesses 8000 tr/min et 12 000 tr/min l'harmonique à $3f_{réseau}$ se confond avec les multiples de la fréquence statorique déjà présents dans le spectre du courant onduleur. Le comportement de l'indicateur fait surtout, en plus de la présence du défaut électrique, apparaître un changement fort juste après le remplacement du roulement sain par le roulement défaillant.

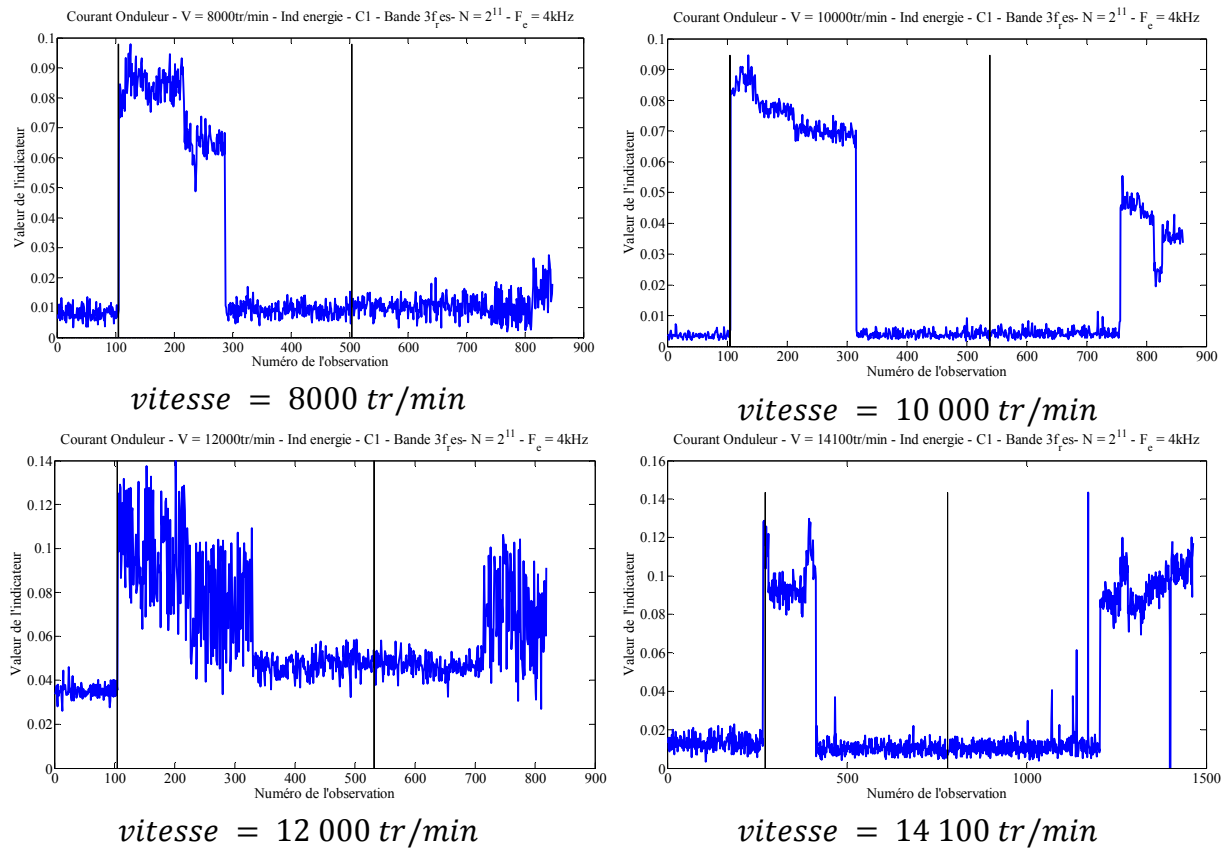


Figure 3-47 : Indicateur énergétique sur le signal courant onduleur pour les fréquences $3f_{rés}$ pour différentes vitesses de fonctionnement

Cette observation peut être reliée à un événement particulier de la campagne d'essai N°1. En effet, quelques heures après le changement de roulement, l'équipement s'est mis en défaut et a dû subir une intervention technique. Il s'est avéré qu'à cause d'un mauvais remontage du roulement, le circlip qui maintient le flasque du roulement s'est échappé (figure 3-48). Ce phénomène est déjà fréquemment survenu dans les campagnes de diagnostic vibratoire antérieures menées chez TECHNOFAN. D'habitude, ce circlip est éjecté à l'extérieur de la machine. Dans notre cas, il est resté à l'intérieur en créant un blocage mécanique qui a causé l'arrêt de la machine.



Figure 3-48 : défaut de flasque

C'est certainement ce phénomène que nous observons à travers les variations de l'indicateur puisque la valeur de ce dernier redescend de nouveau vers une valeur proche des valeurs saines après la réparation.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les principales signatures liées à un défaut de roulements pouvant être extraites des grandeurs physiques prélevées sur l'équipement surveillé (vitesse, position, courant de phase et courant onduleur). Les connaissances de ces signatures nous ont conduits à proposer des indicateurs de défaut automatisés basés sur l'extraction de l'amplitude de certains harmoniques particulièrement sensibles au défaut. Le comportement de ces indicateurs a été évalué par l'intermédiaire de critères de qualité. Ces critères ont bien sûr vocation à comparer entre eux nos résultats, mais aussi à servir de base à des indicateurs de qualité pour des fans montés sur avion. La forme serait certainement modifiée pour tenir compte de la durée de fonctionnement en mode sain beaucoup plus longue. Ils nous ont néanmoins permis de déterminer que :

- D'une manière générale, les indicateurs calculés sur les grandeurs de nature mécanique (vitesse et position) sont plus efficaces que ceux calculés sur les grandeurs de nature électrique (courant statorique et courant d'onduleur), ce qui est une conclusion originale,
- Les campagnes 1 et 2 ont montré que la dégradation du roulement pouvait se présenter avec des dynamiques de dégradation différentes, ce qui complique singulièrement le diagnostic et dégrade la reproductibilité des résultats,
- Le seuil est choisi d'une manière à avoir le minimum de fausses alarmes, le critère de fiabilité FA est donc, pour la plupart des cas évoqués, à plus de 97, critère d'une importance capitale pour l'équipementier aéronautique,
- Le critère de rapidité est le moins bon parmi les critères étudiés. L'indicateur proposé détecte donc le défaut, pour certains cas, avec un certain retard par rapport à l'indicateur vibratoire, mais ceci ne semble pas rédhibitoire.

L'indicateur est construit sur des harmoniques liés à des signatures présentes seulement dans la campagne N°1, provenant de la présence d'un défaut électrique et d'un défaut de flasque pendant cette campagne. Nous avons montré que l'indicateur énergétique peut être utilisé pour détecter à la fois des défauts électriques et des défauts mécaniques, ce qui est un avantage certain et une utilisation originale d'un indicateur conçu à la base pour des défauts mécaniques.

Finalement, nous remarquons une variance non négligeable dans les valeurs des indicateurs, selon les vitesses, les fréquences sélectionnées ou le type de dégradation. Ceci montre que l'apparition des harmoniques que nous surveillons à travers ces indicateurs présente un caractère aléatoire non négligeable. Leur présence et/ou leur importance au cours des observations successives est variable, conduisant à des indicateurs eux aussi variables. Ce caractère stochastique constitue une des raisons qui nous a conduits à utiliser des outils d'analyse différents, comme le Kurtosis spectral qui permet d'intégrer cette dimension probabiliste et qui sera présenté avec ses résultats dans le chapitre 4.

Chapitre 4 : Construction d'indicateurs statistiques utilisant le Kurtosis Spectral pour la détection de défauts de roulements

4.1 Introduction

Le chapitre 3 s'est basé sur les variations de l'amplitude de certains harmoniques, pour parvenir à construire des indicateurs permettant d'assurer, sous certaines conditions, une détection des défauts de roulements. Cependant, l'observation des critères de qualité nous permet de constater que les performances obtenues sont plus ou moins robustes en fonction des vitesses de rotation de l'actionneur et des bandes de fréquences considérées. De plus, les valeurs des critères présentent d'importantes variations sur l'ensemble des deux campagnes d'essais, les résultats ne sont donc pas parfaitement robustes non plus par rapport au roulement ou à sa dégradation. La variance constatée sur certains indicateurs met en évidence un caractère stochastique lié à l'apparition de certains harmoniques dont nous surveillons l'amplitude. Ceci nous conduit à constater que la reproductibilité et la robustesse de ces indicateurs est discutable et qu'ils doivent être améliorés. Enfin, nous avons remarqué que pour certains cas, la détection du défaut en utilisant les signaux de courant statorique ou courant onduleur est impossible, le niveau de séparation entre les cas sains et défectueux étant trop faible. La robustesse du diagnostic n'est pas assurée dans ces situations.

Comme nous l'avons déjà évoqué, les défaillances générées au sein des roulements céramiques sont issues de la détérioration des propriétés des graisses de lubrification et de fractures de la cage de maintien des billes. Des signatures fréquentielles de ces phénomènes sont bien présentes (chapitre 3) mais la dégradation des roulements va également engendrer d'autres effets, parmi lesquels, nous pouvons évoquer :

- les variations du couple de frottement interne du roulement plutôt que des effets de type chocs ponctuels liés au passage d'une bille sur une aspérité de la surface de roulements des bagues internes ou externes. De ce fait, compte tenu de la mobilité de la graisse détériorée à l'intérieur du roulement, la manifestation physique du défaut risque de se faire de manière non périodique [91], contrairement à une détérioration des chemins de roulement pour laquelle la révolution mécanique du roulement sur un tour entraînera à chaque fois les mêmes effets.
- les perturbations du couple mécanique faisant intervenir la fréquence caractéristique de cage. Les effets du défaut de cage sont difficiles à prévoir mais il est sûr que, comme précédemment, ces défauts ne sont pas de type ponctuel et qu'ils risquent de conduire à des effets non périodiques [91].

Pour améliorer les performances de l'indicateur, l'étude s'est donc dirigée vers la recherche d'outils et la conception de méthodes permettant de mettre en évidence l'apparition de composantes fréquentielles possédant un caractère d'apparition aléatoire. Ainsi, contrairement à la méthode plus classique précédemment employée qui consistait à repérer l'augmentation d'énergie de composantes périodiques liées aux défauts, nous nous dirigeons vers l'utilisation de méthodologies permettant de faire apparaître certaines propriétés liées au caractère aléatoire de ces composantes fréquentielles. L'étude du Kurtosis et du Kurtosis spectral, par l'introduction d'aspects relatifs aux propriétés statistiques du signal, vont nous permettre d'améliorer le comportement des indicateurs de défaut.

Dans une première partie, nous étudions le Kurtosis et le Kurtosis Spectral d'un point de vue théorique et nous donnons quelques exemples pour illustrer l'utilité du Kurtosis spectral pour la détection du défaut. Dans une deuxième partie, nous montrons les SK (Spectral Kurtosis) des signaux obtenus en cas sain et défaillant pour les toutes les grandeurs mesurées, vitesse, position, courant statorique et courant d'onduleur. Cette étude complète nous permettra de cibler le calcul des indicateurs par Kurtosis spectral sur certaines fréquences sensibles au défaut étudié. Puis, dans une troisième partie, nous introduisons le Kurtosis spectral cumulé à partir duquel nous construisons des indicateurs. Nous présentons alors l'analyse des campagnes d'essais avec ces outils, comme précédemment pour plusieurs points de fonctionnement et une comparaison de performances avec les indicateurs énergétiques est menée en utilisant les critères de performances déjà mis en place dans le chapitre 3. Enfin, nous abordons dans une quatrième partie une variante originale de l'indicateur par Kurtosis spectral, le Kurtosis spectral avec référence. Cette méthode sera utilisée pour palier certains inconvénients du SK afin d'améliorer la robustesse de l'indicateur en présence d'évènements rapides qui ne sont pas directement liés aux défauts de roulements et qu'il faut rejeter si l'on veut se limiter à ce type de défauts.

Rappelons toujours que nous présentons les résultats obtenues pour la campagne N°1. Les résultats de la campagne N°2 seront présentés dans l'Annexe C .

4.2 Introduction du Kurtosis Spectral, outils d'étude statistique pour les signaux à caractère non stationnaire

La stationnarité est une propriété particulièrement importante pour l'analyse des signaux aléatoires. Un signal aléatoire est stationnaire si ses propriétés statistiques sont invariantes par translation dans le temps. En effet, un signal est dit stationnaire de premier ordre quand sa valeur moyenne et sa variance (4-1) sont indépendantes du temps [107] :

$$E[x(t)] = m \text{ indépendant du temps.} \quad (4-1)$$

Un signal est dit stationnaire de deuxième ordre quand les fonctions de distribution du deuxième ordre (autocorrélation et covariance) dépendent seulement du décalage temporel entre 2 signaux ($\tau = t_2 - t_1$) et pas du temps [107], expression (4-2) :

$$E[x(t + \tau)x(t)^*] = R(\tau) \text{ indépendant du temps.} \quad (4-2)$$

D'un point de vue plus pratique, pour les signaux que nous prélevons sur l'équipement, nous associons à un défaut à caractère stationnaire, un défaut dont la signature lorsqu'elle se manifeste dans une grandeur, reste en permanence détectable. Par exemple, un défaut localisé de type bague interne ou externe est un défaut à caractère stationnaire. En effet, à chaque fois qu'une bille passe sur la zone affectée par le défaut, elle sera en contact avec le défaut et

produira un évènement qui se répètera plusieurs fois par tour mécanique. Un défaut à caractère non stationnaire est quant à lui assimilé à un défaut qui crée une signature dont la présence et la nature peuvent varier au cours des observations.

4.2.1 Définition du Kurtosis

Commençons tout d'abord par des définitions intermédiaires de fonctions caractéristiques et de quelques quantités statistiques associées aux variables aléatoires [108].

Soit x une variable aléatoire.

- La première fonction caractéristique de x est la fonction génératrice des moments (4-3) qui est définie comme le moment généralisé de la fonction exponentielle : $g(x) = e^{jtx}$

$$\varphi_x(t) = E[e^{jtx}] = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{jtu} dF_x(u) \quad (4-3)$$

Où $F_x(u)$ est la fonction de répartition de x .

- La seconde fonction caractéristique de x est définie par l'expression (4-4) en prenant le logarithme Népérien complexe de $\varphi_x(t)$:

$$\psi_x(t) = \ln(\varphi_x(t)) \quad (4-4)$$

- Les moments d'ordre r de la variable aléatoire x sont définis par (4-5) :

$$\mu'_x(r) = E[x^r] = \int_{-\infty}^{+\infty} u^r dF_x(u) \quad (4-5)$$

- Le cumulante d'ordre r de la variable aléatoire x (4-6), est la dérivée d'ordre r de la seconde fonction caractéristique calculée en $t = 0$:

$$k_x(r) = (-j)^r \frac{d^r}{dt^r} [\psi_x(t)]_{t=0} \quad (4-6)$$

- La variable standardisée est définie dans (4-7) en centrant la variable aléatoire x et en la normalisant par son écart-type :

$$\tilde{x} = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (4-7)$$

- Le Kurtosis ou facteur d'aplatissement de la variable aléatoire x est défini comme le cumulante d'ordre 4 de la variable standardisée (4-8):

$$k_{x(4)} = k_{\tilde{x}(4)} \quad (4-8)$$

C'est le rapport (4-9) entre le cumulatif d'ordre 4 et le cumulatif d'ordre 2 au carré de la variable aléatoire :

$$k^1_{x(4)} = \frac{k_{x(4)}}{(k_{x(2)})^2} \quad (4-9)$$

Une autre définition du Kurtosis par les moments est la suivante (4-10):

$$k^2_{x(4)} = \frac{\mu'_{x(4)}}{(\mu'_{x(2)})^2} \quad (4-10)$$

Les deux définitions sont liées par la relation (4-11) :

$$k^1_{x(4)} = k^2_{x(4)} - 3 \quad (4-11)$$

Le Kurtosis est une mesure de l'aplatissement de la distribution de probabilité d'une variable aléatoire à valeurs réelles. Elle est définie (4-12) comme étant le quatrième cumulatif central divisé par le carré de la variance de la distribution de probabilité (ou le cumulatif central d'ordre 2) [109][110]:

$$k(x) = \frac{\sum (x_i - \mu)^4}{(\sum (x_i - \mu)^2)^2} - 3, i = 1..taille(x) \quad (4-12)$$

Une valeur positive du Kurtosis signifie l'apparition de déviations extrêmes non fréquentes dans le signal. Dans ce cas, la distribution du signal est a priori pointue et le Kurtosis est appelé « leptokurtic ». Une valeur -1 du Kurtosis signifie que le signal a une distribution plate, le Kurtosis est alors appelé « platykurtic ». Le Kurtosis est égal à zéro quand la distribution du signal est gaussienne, dans ce cas le Kurtosis est « mesokurtic » [111]. Une autre définition du Kurtosis est la mesure de déviation par rapport à une distribution gaussienne. Nous montrons sur la figure 4-1 le Kurtosis de certaines distributions connues.

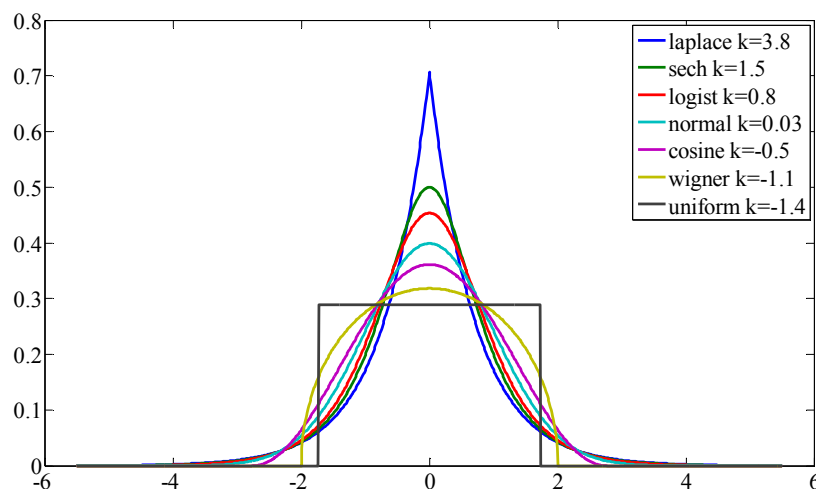


Figure 4-1 : Kurtosis de certaines distributions connues

Nous pouvons observer la relation entre le Kurtosis et l'aplatissement de la distribution. Le Kurtosis est maximal pour la distribution Laplace (pointue), et minimal pour la distribution uniforme (plate).

4.2.2 Introduction du Kurtosis spectral

Le Kurtosis spectral (KS) est défini comme le Kurtosis de la partie réelle ou imaginaire ou le module des composantes spectrales d'un signal [108]. Sa définition théorique a été donnée en utilisant les cumulants de variables aléatoires complexes [112]. Le Kurtosis spectral est défini encore comme la mesure de la distance à la « gaussiannité » des diverses composantes spectrales [113].

Soit $x(t)$ une fonction temporelle, et $x(n)$ sa fonction discrète associée. Notons $X(m)$ la transformée de Fourier discrète de $x(n)$. Le Kurtosis spectral de $x(n)$ est défini comme le Kurtosis de $X(m)$ sur chaque fréquence (4-13):

$$SK_x(m) = \frac{E\{|X(m)|^4\}}{E\{|X(m)|^2\}^2} - 2 \quad (4-13)$$

La normalisation ici se fait par la soustraction de 2 pour avoir un Kurtosis spectral égal à -1 pour une composante périodique pure. D'un point de vue pratique, le calcul du Kurtosis spectral nécessite plusieurs réalisations du spectre, ce qui revient à calculer la transformée de Fourier à court terme (TFCT) [114] appelée encore transformée de Fourier à fenêtre glissante (4-14) ou transformée de Fourier locale (Short Time Fourier Transform).

$$TFCT[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(\tau - t)e^{-j2\pi f\sigma}d\sigma \quad (4-14)$$

où $w(t)$ est la fonction de fenêtrage. La TFCT d'un signal discret est calculée de la manière suivante (4-15):

$$TFCT[x(n)] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n)w(n - m)e^{-jwn} \quad (4-15)$$

où $w(n)$ est la fonction de fenêtrage discrète.

En appliquant la TFCT sur un signal $x(n)$ une représentation temps-fréquence $H(n, kF)$ est obtenue. Nous calculons le Kurtosis de ce signal (4-16) pour chaque valeur de kF comme l'indique la formule suivante :

$$SK_x(kF) = \frac{\sum_{\eta=\eta_0}^{\eta_f} H^4(\eta_i, kF)}{\{\sum_{\eta=\eta_0}^{\eta_f} H^2(\eta_i, kF)\}^2} - 2 \quad (4-16)$$

où $[\eta_0, \dots, \eta_f]$ représentent les différentes réalisations.

La méthode de calcul du Kurtosis spectral est illustrée sur la figure 4-2 [115].

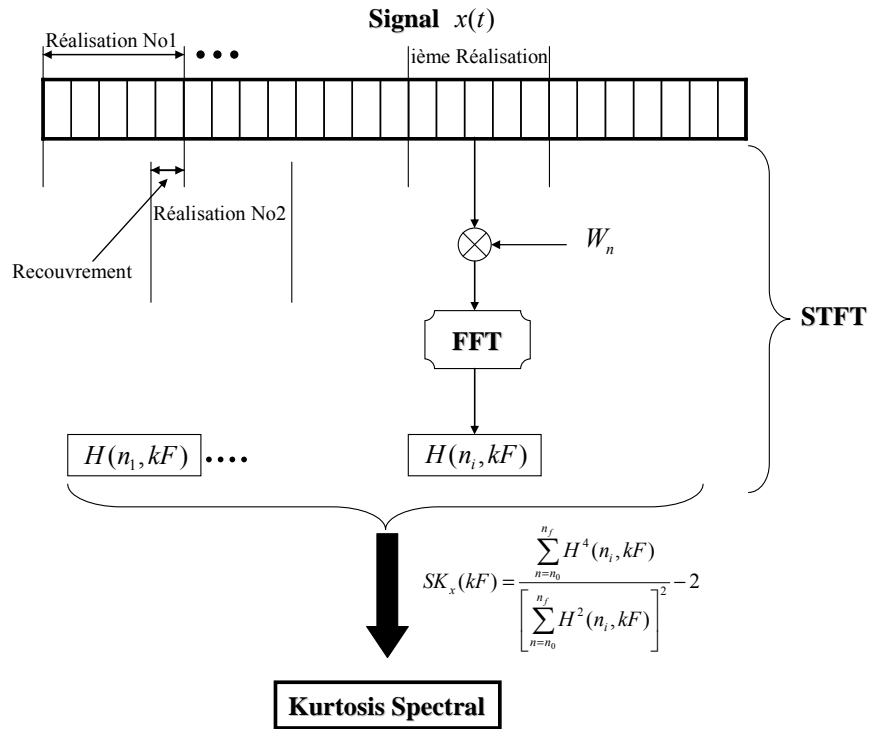


Figure 4-2 : Calcul du Kurtosis spectral

4.2.3 Exemple d'un signal de synthèses analysé avec le Kurtosis Spectral

Prenons l'exemple d'un signal construit de la façon suivante :

- Un signal sinusoïdal pur à la fréquence 0,15 Hz,
- Un chirp fréquentiel avec une fréquence variable linéairement entre les deux valeurs $f_{min} = 0,1 - 10^{-3} Hz$ et $f_{max} = 0,1 + 10^{-3} Hz$,
- Un bruit blanc gaussien filtré par un filtre centré à 0,18 Hz et de bande passante 0,4 Hz.

L'intérêt de prendre un tel signal réside dans le fait qu'il contient une partie purement stationnaire (le sinus), une partie non stationnaire (le chirp) et un bruit. Le Kurtosis spectral est évalué sur $\eta_f = 900$ réalisations de 1024 points chacune. La figure 4-3 montre la FFT et le Kurtosis spectral de ce signal. La figure 4-4 montre la TFCT du signal où l'intensité du couleur présente l'amplitude de l'harmonique (plus le couleur est intense plus l'amplitude de l'harmonique est importante).

4.2 Introduction du Kurtosis Spectral, outils d'étude statistique pour les signaux à caractère non stationnaire

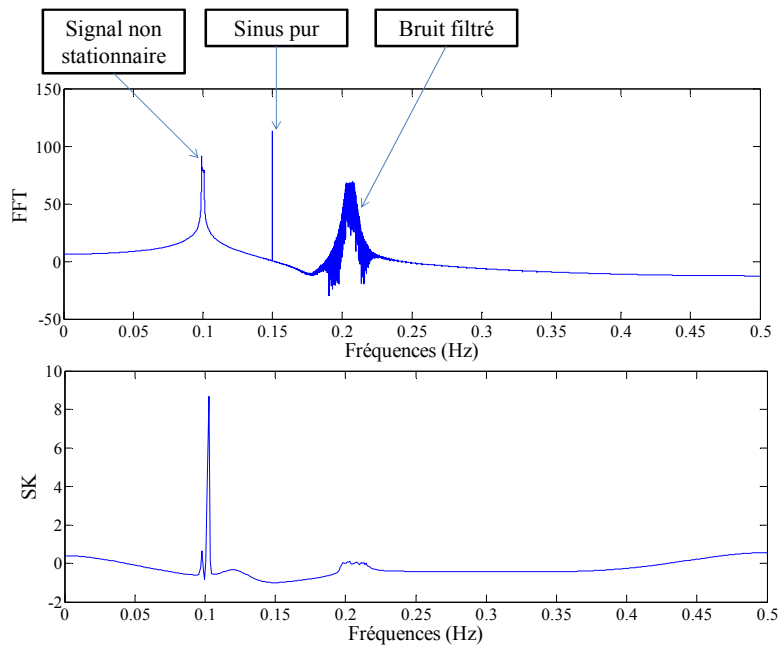


Figure 4-3 : FFT et SK du signal mêlant caractère stationnaire, non stationnaire et bruit

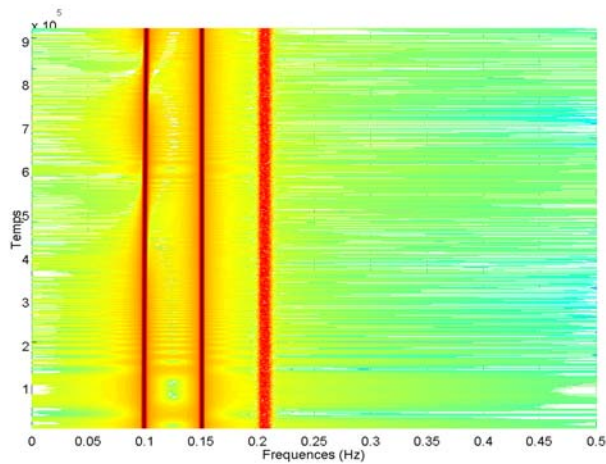


Figure 4-4 : TFCT du signal mêlant caractère stationnaire, non stationnaire et bruit

Nous constatons sur la figure 4-3 que la FFT fait bien apparaître les 3 composantes constituant le signal synthétisé : une composante stationnaire, une composante non stationnaire et une composante liée au bruit. Si l'on observe la TFCT (figure 4-4), nous remarquons que le caractère non stationnaire de la composante chirp n'apparaît pas très clairement du fait de sa faible excursion fréquentielle. Ainsi, ces deux représentations ne permettent pas de faire apparaître de manière explicite des informations sur la nature de ces composantes.

Si nous évaluons maintenant le Kurtosis spectral à partir de la TFCT, nous constatons (figure 4.3) qu'à la composante purement sinusoïdale correspond une valeur de -1 (caractère stationnaire), au chirp fréquentiel correspond une valeur plus grande que 1 (caractère non stationnaire) et au bruit correspond une valeur proche du zéro. Il est donc possible d'obtenir des informations supplémentaires par rapport au spectre et à la TFCT d'un signal.

L'idée sous-jacente est donc d'exploiter les composantes positives du SK pour mettre en évidence les caractères de non stationnarité de certains harmoniques, dont l'apparition dans un spectre et la disparition dans l'autre, seraient liées aux défauts. Puisque qu'il est manifeste, aux vues des études réalisées dans le chapitre précédent, que le défaut de roulements entraîne des variations plus ou moins aléatoires du contenu harmoniques des signaux, nous allons mettre en évidence que le SK nous permettra de mieux les détecter qu'un indicateur énergétique basé sur une simple surveillance d'amplitudes.

4.3 Introduction du Kurtosis Spectral dans sa représentation cumulée

Comme indiqué précédemment, le principe de calcul du Kurtosis Spectral consiste à utiliser un nombre η_f de spectres pour réaliser un calcul statistique sur l'ensemble des observations. L'obtention d'un nouveau Kurtosis Spectral nécessite donc d'attendre de disposer à nouveau de η_f spectres pour évaluer la nouvelle statistique.

Un des inconvénients de cette démarche réside dans la limitation de la dynamique d'évolution du Kurtosis spectral puisque l'évolution de son contenu ne peut être contrôlée qu'après l'accumulation des η_f spectres. De plus, si une composante spectrale liée à un défaut apparaît dans plusieurs des η_f spectres servant au calcul de la statistique, elle sera considérée, au fur et à mesure de ses apparitions comme de moins en moins stationnaire (donc de plus en plus périodique). L'amplitude de cette composante deviendra donc décroissante au fur et à mesure de l'augmentation du nombre de ses apparitions. Sa détection par une surveillance des composantes positives dans le SK sera donc rendue plus difficile au fil du temps.

Nous introduisons alors le Kurtosis Spectral dans sa représentation cumulée. Cette approche originale consiste à évaluer la statistique pour chaque nouveau spectre disponible, au lieu d'attendre les η_f spectres. De plus, au lieu de remettre à zéro le calcul de la statistique tous les η_f spectres, l'ensemble des observations est conservé. La figure 4-5 illustre la méthode de calcul du Kurtosis cumulé.

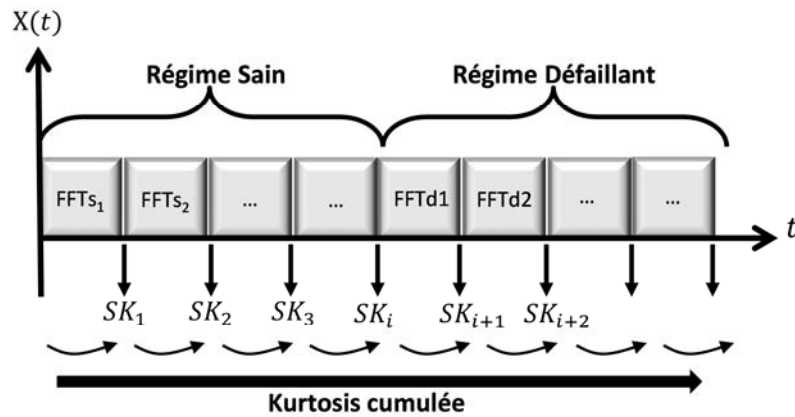


Figure 4-5 : Calcul du Kurtosis spectral cumulé

Cette stratégie permet de palier l'inconvénient de la faible dynamique du Kurtosis Spectral. Ainsi, après avoir cumulé un certain nombre de spectres, dès qu'un nouvel harmonique apparaît, le Kurtosis Spectral cumulé réagit. Pour illustrer cette propriété, observons l'exemple d'un signal qui contient un harmonique stationnaire, c'est-à-dire présent pour toutes les observations. Le Kurtosis Spectral de ce signal est toujours égal à -1. Considérons maintenant l'introduction d'un deuxième harmonique présent dans ce signal à partir d'un instant T_p . Le taux de présence de cet harmonique est exprimé en % des observations totales après l'instant T_p . Par exemple pour le cas où l'harmonique est présent sur 20% des observations, il est présent deux fois toutes les dix observations (présent sur deux observations, non présent sur huit observations, et ainsi de suite). Nous montrons sur la figure 4-5 l'évolution du Kurtosis spectral de l'harmonique considéré pour 10,20, ... 100% de présence. Les valeurs montrées sur cette figure sont les valeurs maximales du Kurtosis spectral autour de l'harmonique considéré.

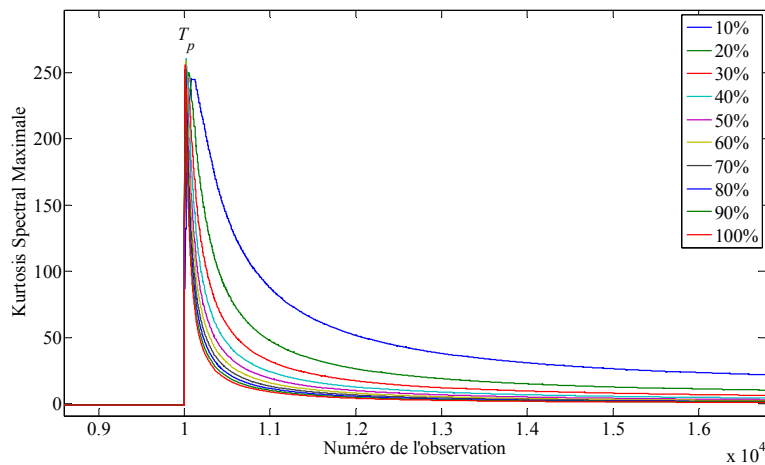


Figure 4-6 : Evolution du Kurtosis spectral cumulé en présence d'un harmonique non stationnaire

Nous remarquons que le Kurtosis spectral réagit immédiatement au moment de l'apparition de l'harmonique non stationnaire. De plus, la statistique d'observation n'est jamais remise à 0,

contrairement, rappelons-le, au Kurtosis Spectral classique où toutes les anciennes observations sont oubliées et où seules les η_f derniers spectres entrent servent à évaluer la statistique. Ainsi, comme nous pouvons l'observer, la valeur du Kurtosis spectral diminue puisque l'harmonique ajouté est à nouveau observé par la suite (sur au moins 10% des observations). Nous constatons que moins l'harmonique est présent dans les observations, plus la valeur du Kurtosis spectral diminue lentement. Si l'harmonique devient stationnaire (cas à 100% de présence), la valeur limite du Kurtosis tend vers une limite positive différente de zéro, ce qui permet toujours de distinguer qu'au cours des observations, il y a eu apparition d'une composante fréquentielle. Nous montrons sur la figure 4-7 la dernière valeur du Kurtosis spectral cumulé après 10 000 observations sans la présence de l'harmonique non stationnaire, et 10 000 observations avec la présence de l'harmonique non stationnaire en fonction du pourcentage de présence.

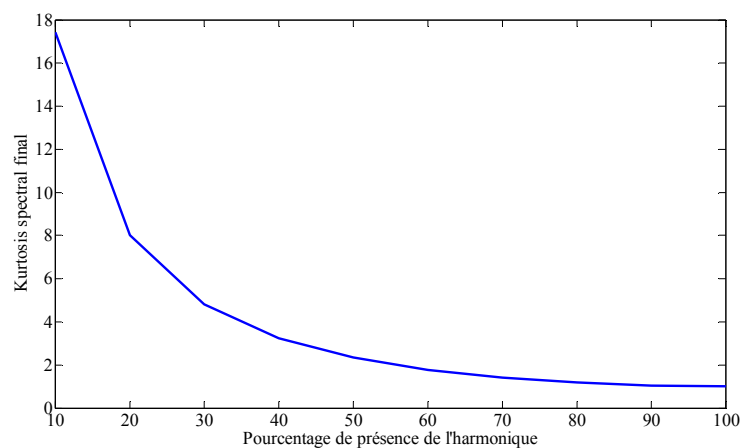


Figure 4-7 : Valeur finale du Kurtosis spectral

Nous remarquons que, quand l'harmonique est présent à 100% dans les observations, la valeur finale du Kurtosis spectral tend vers une valeur supérieure à la valeur du Kurtosis spectral en sain. Cette méthode présente l'avantage de conserver les informations contenues dans toutes les observations précédentes. Ainsi, une composante non présente au début d'une observation puis présente en permanence par la suite sera détectable de bien meilleure manière qu'avec le Kurtosis spectral classique qui, par la remise à 0 de la statistique fait disparaître les composantes devenant périodiques.

Etudions maintenant l'influence du nombre d'observations cumulées sur la variation maximale du Kurtosis spectral. Nous avons remarqué que, plus nous cumulons des spectres en état sain (c'est-à-dire l'harmonique n'est pas présent), plus la valeur du Kurtosis spectral maximal (sur la première observation où l'harmonique sera présent) sera importante.

4.3.1 Application du Kurtosis cumulé sur un signal de synthèse modulé en phase

Pour observer le comportement du Kurtosis spectral cumulé sur un exemple plus proche des signaux réels générés par l'équipement, nous allons l'appliquer sur un signal modulé en fréquence (4-17).

$$y_{PM}(t) = A \cos(2\pi f_s t + \alpha_{PM} m(t) \cos(2\pi f_{P_Mod} t)) + b(t) \quad (4-17)$$

avec $A = 10$, $f_s = 600 \text{ Hz}$, $f_{P_Mod} = 200 \text{ Hz}$, $\alpha_{PM} = 0.05$ et $b(t)$ un bruit blanc gaussien.

Les fréquences f_s et f_{P_Mod} sont choisies de manière à avoir les mêmes fréquences harmoniques que sur les signaux du ventilateur à la vitesse de 12000 tr/min. Dans ce cas, la fréquence mécanique est de 200 Hz et pour un nombre de paires de pôles de la machine égal à 3, nous obtenons une fréquence statorique de 600 Hz.

Par ailleurs, $m(t)$ est une fonction caractérisant la présence ou l'absence de modulation sur le signal synthétisé. L'indice de modulation α_{PM} est fixé à 0,05. Ainsi, pour mieux voir comment se manifeste le Kurtosis spectral en présence de modulations, nous définissons $m(t)$ de la manière suivante (4-18):

$$m(t) = \begin{cases} 1 \rightarrow t \in \left[0,3 ; 0,3 + \frac{T_p}{T}\right] T \cup \left[0,5 ; 0,5 + \frac{T_p}{T}\right] T \cup \left[0,7 ; 0,7 + \frac{T_p}{T}\right] T \\ 0 \rightarrow \text{ailleurs} \end{cases} \quad (4-18)$$

T est la durée du signal analysé et T_p est le temps de présence de la modulation.

Le Kurtosis spectral est alors évalué en utilisant une fenêtre de taille égale à quatre fois le temps de présence de la modulation. Les signaux de synthèse sont générés avec une fréquence d'échantillonnage de 50 kHz. La taille du signal simulé est de 10^6 points ce qui correspond à 20 s d'observation. La figure 4-8 montre la valeur maximale du Kurtosis spectral cumulé élevé au carré d'un tel signal.

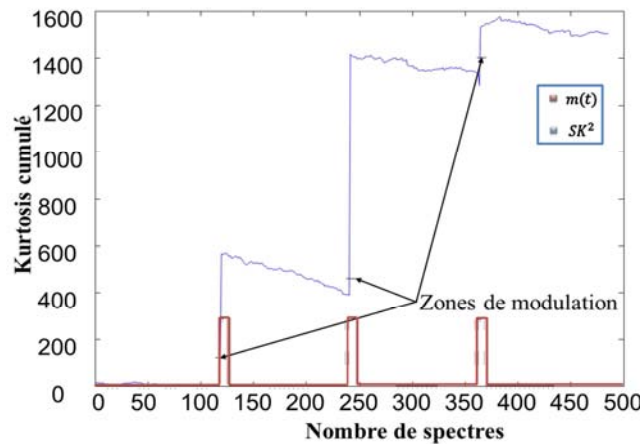


Figure 4-8 : SK cumulé maximal élevé au carré pour une modulation de fréquence

Nous remarquons la présence d'un saut de valeur de l'indicateur sur le début des zones de modulation. Ce saut vient de l'apparition de la nouvelle raie dans le spectre du signal. On remarque bien que le Kurtosis Spectral cumulé retranscrit bien les événements se produisant dans le signal au cours des observations. Après chaque saut, le Kurtosis spectral a tendance à diminuer, ce qui indique que l'harmonique correspondant devient de plus en plus stationnaire.

4.4 Kurtosis Spectral du signal vitesse

Dans cette partie, nous proposons tout d'abord d'observer le Kurtosis spectral du signal de vitesse afin d'observer si certaines composantes sont associées ou non à un caractère non stationnaire. L'utilisation du Kurtosis spectral cumulé sera exploitée ultérieurement pour la construction d'indicateurs (figure 4-9). La figure 4-10 montre, pour la campagne 1, deux SK de la vitesse pour 12 000 tr/min. Pour cet exemple, le SK est construit à partir de spectres évalués avec une FFT calculés sur des échantillons de signal de 4s, avec une fréquence d'échantillonnage de 1200 Hz. Le premier (SK_{sain}) en bleu, correspond au SK obtenu à partir de N_s spectres tirés de l'ensemble des observations du régime sain. Le second ($SK_{défaut}$) en rouge, correspond au SK obtenu sur l'ensemble des spectres $N_s + N_d$ spectres de la campagne.

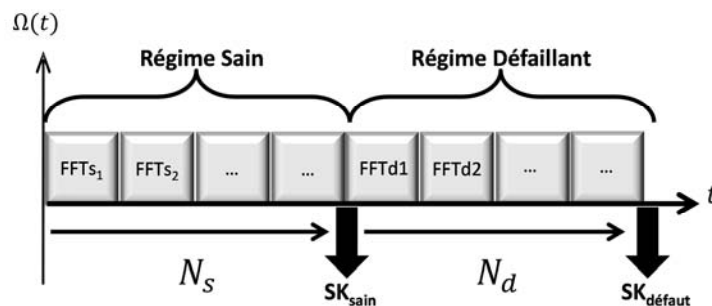


Figure 4-9 : calcul du Kurtosis spectral de vitesse

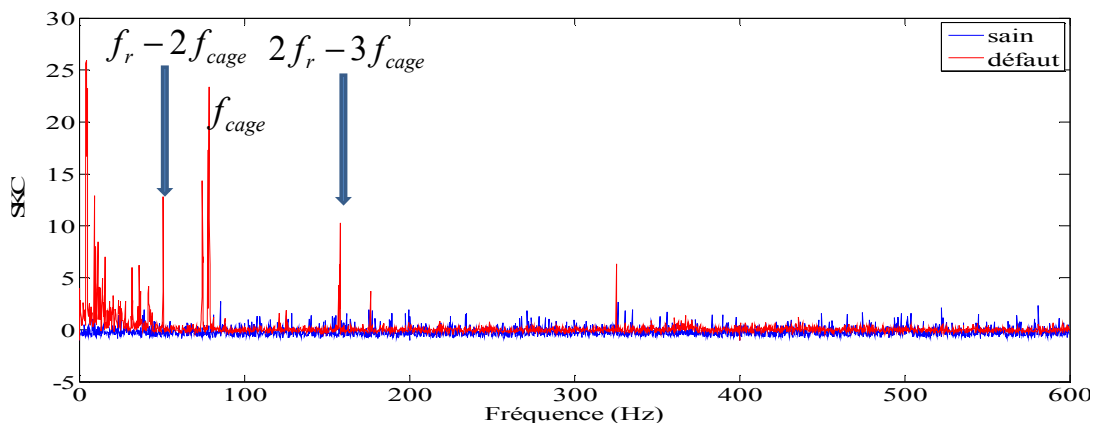


Figure 4-10 : Kurtosis Spectral de Vitesse à 12000 tr/min

Comme nous pouvons l'observer sur la figure 4-10, le SK obtenu pour la vitesse 12 000 tr/mn à la fin de la campagne d'essai comporte un ensemble de signatures qui permettent de distinguer le cas sain du cas défaillant. Nous constatons que les signatures les plus remarquables en cas de défaut sont pour des fréquences inférieures à la fréquence de rotation. Nous retrouvons les bandes fréquentielles déjà mises en évidence lors des études spectrales du chapitre précédent. En effet, les composantes à $f_{osc_SK} = f_{cage}$, $f_{osc_SK} = f_r - 2f_{cage}$ et $f_{osc_SK} = 2f_r - 3f_{cage}$ présentent dans le SK final des valeurs largement positives. Ces harmoniques ont des amplitudes importantes dans le SK de la vitesse car, n'apparaissant pas dans le régime sain, elles ressortent de manière forte dans le SK. Ainsi, même si les indicateurs du chapitre 3, basés sur des hypothèses de stationnarité des harmoniques, permettait de mettre en évidence la présence du défaut, il semble qu'un caractère aléatoire important puisse être associé aux fréquences faisant intervenir la fréquence caractéristique de cage. La présence d'amplitude importante dans le Kurtosis spectral sur la fréquence de cage est causée à la fois par l'absence de cet harmonique en régime sain et par son caractère aléatoire à cette fréquence (caractère non stationnaire).

Nous retrouvons ensuite des harmoniques situés dans la zone basse fréquence du SK de la vitesse. Cette zone fréquentielle est par exemple approximativement située entre 0 et 50Hz pour la vitesse de 12 000 tr/min. Un ensemble d'harmoniques de fréquence $f_{osc_SK_BF}$ y est présent mais ces fréquences sont difficiles à évaluer avec exactitude. L'augmentation de l'amplitude des harmoniques à f_r ne ressort pas nettement dans le SK. Ces derniers étant présent à la fois en sain et en défaillant, l'augmentation de leur amplitude entre les mesures saines et défaillantes n'est pas suffisante pour faire réagir la statistique.

La figure 4-11 montre le Kurtosis spectral de deux signaux, un sain et un défaillant à la vitesse 8000 tr/min (idem pour la figure 4-12 à 10 000 tr/min et la figure 4-13 à 14 100 tr/min).

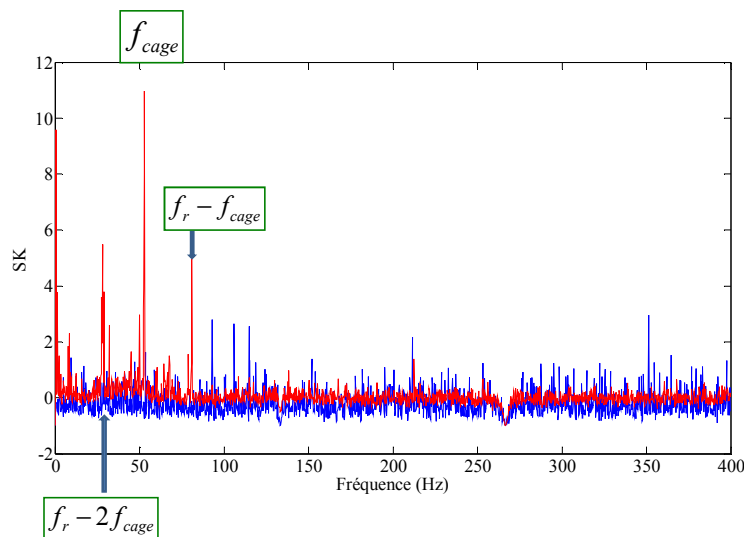


Figure 4-11 : Kurtosis Spectral de vitesse à 8000 tr/min

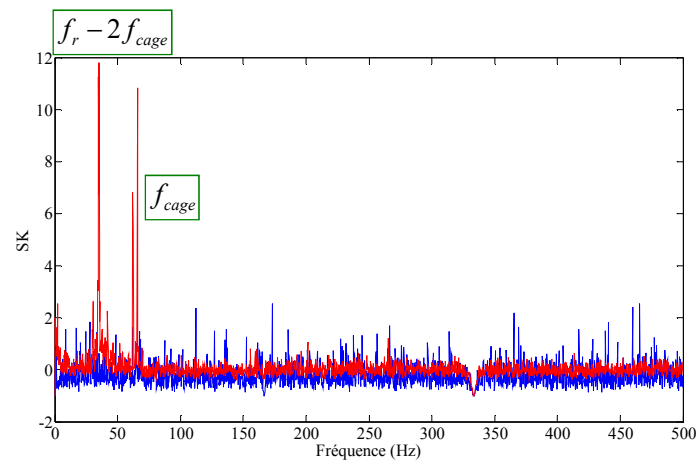


Figure 4-12 : Kurtosis Spectral de vitesse à 10000 tr/min

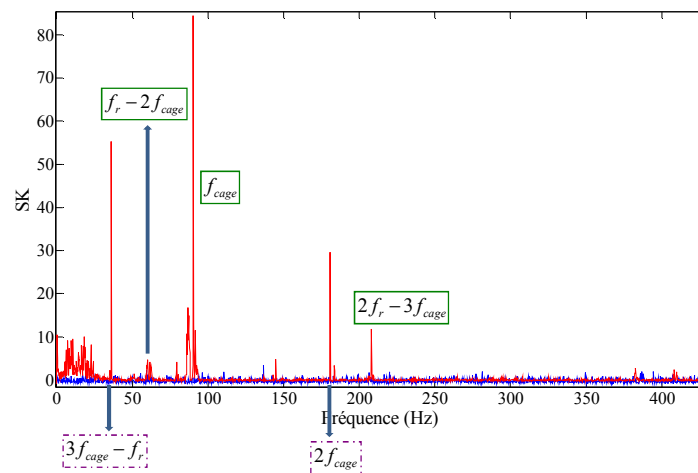


Figure 4-13 : Kurtosis Spectral de vitesse à 14100 tr/min

Sur les figures précédentes, nous observons nettement un niveau de Kurtosis spectral plus fort dans certaines zones fréquentielles par rapport au cas sain. De manière générale, le Kurtosis spectral de la vitesse fait donc bien apparaître dans le cas défaillant, des harmoniques présentant clairement un caractère stochastique. Nous montrons dans le tableau 4-1 les harmoniques présents seulement en défaillant pour les différentes vitesses de fonctionnement.

Vitesse	Familles de fréquences					
8000 tr/mn	f_{cage}	$f_r - 2f_{cage}$	f_{BF}	$f_r - f_{cage}$		
10 000 tr/mn	f_{cage}	$f_r - 2f_{cage}$				
12 000 tr/mn	f_{cage}	$f_r - 2f_{cage}$	f_{BF}	$2f_r - 3f_{cage}$		
14 100 tr/mn	f_{cage}	$f_r - 2f_{cage}$	f_{BF}	$2f_r - 3f_{cage}$	$2f_{cage}$	$3f_{cage} - f_r$

Tableau 4-1 : Fréquences sensibles aux défauts de roulements pour les différentes vitesses de fonctionnement (SK vitesse)

4.5 Kurtosis Spectral du signal position

Le spectre du signal de position fait apparaître en cas de défaut, des harmoniques à $(2k + 1) \cdot f_s \pm f_{osc_{cage}}$, liés à la fréquence de cage et n'existant pas en régime sain. Ces harmoniques devraient donc être présents dans le SK de la position. Le tableau 4-2 récapitule donc, pour $k = 0$ les harmoniques liés à la fréquence de cage et attendus dans le SK de la position.

Harmoniques attendus dans le SK de la position	Valeurs pour 12 000 tr/min
$f_s \pm f_{cage}$	525 Hz - 625 Hz
$f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$	550 Hz - 650 Hz
$f_s \pm (2f_r - 3f_{cage})$	425 Hz - 775 Hz
$f_s \pm (2f_r - f_{cage})$	275 Hz - 925 Hz

Tableau 4-2 : Récapitulatif des harmoniques liés à la fréquence de cage attendus dans le SK de la position pour 12 000 tr/min

Rappelons que le SK de la vitesse fait apparaître en régime défaillant un ensemble d'harmoniques non stationnaires basse fréquence entre 0 et f_{BF} . Ces variations non stationnaires vont directement impacter toutes les fréquences liées à f_r présentes sur le signal position. Ainsi, tout harmonique à une fréquence f_h liée à f_r , se retrouvera dans le SK de la position sous la forme $f_h \pm [0 \dots f_{BF}]$. Ce sera le cas pour les harmoniques du tableau 4-2. Par exemple, on aura pour $f_h = f_s \pm f_{cage}$ une zone de variation fréquentielle à $f_s \pm f_{cage} \pm [0 \dots f_{BF}]$.

De la même manière, les harmoniques liées aux oscillations de vitesse à f_r et $2f_r$ apparaissent dans le spectre de la position sous la forme $f_h = (2k + 1) \cdot f_s \pm f_r$ et $f_h = (2k + 1) \cdot f_s \pm 2f_r$. Ils sont cependant présents à la fois en régime sain et en régime défaillant et devraient donc apparaître dans le SK de la position avec une amplitude négative tendant vers -1. Nous devrions donc retrouver sur le SK de la position, les effets de la non stationnarité basse fréquence de la vitesse autour des fréquences $(2k + 1) \cdot f_s \pm f_r \pm [0 \dots f_{BF}]$ et $(2k + 1) \cdot f_s \pm 2f_r \pm [0 \dots f_{BF}]$. La variation basse fréquence de f_r concerne également les fréquences fondamentales du signal position, d'où la présence des familles $(2k + 1) \cdot f_s \pm [0 \dots f_{BF}]$.

La figure 4-14 représente le Kurtosis Spectral de la vitesse et celui de la position. L'observation du SK de position met en évidence l'apparition des harmoniques non stationnaires liés à la fréquence de cage. Ce sont bien ceux attendus et prédits dans le tableau 4-2.

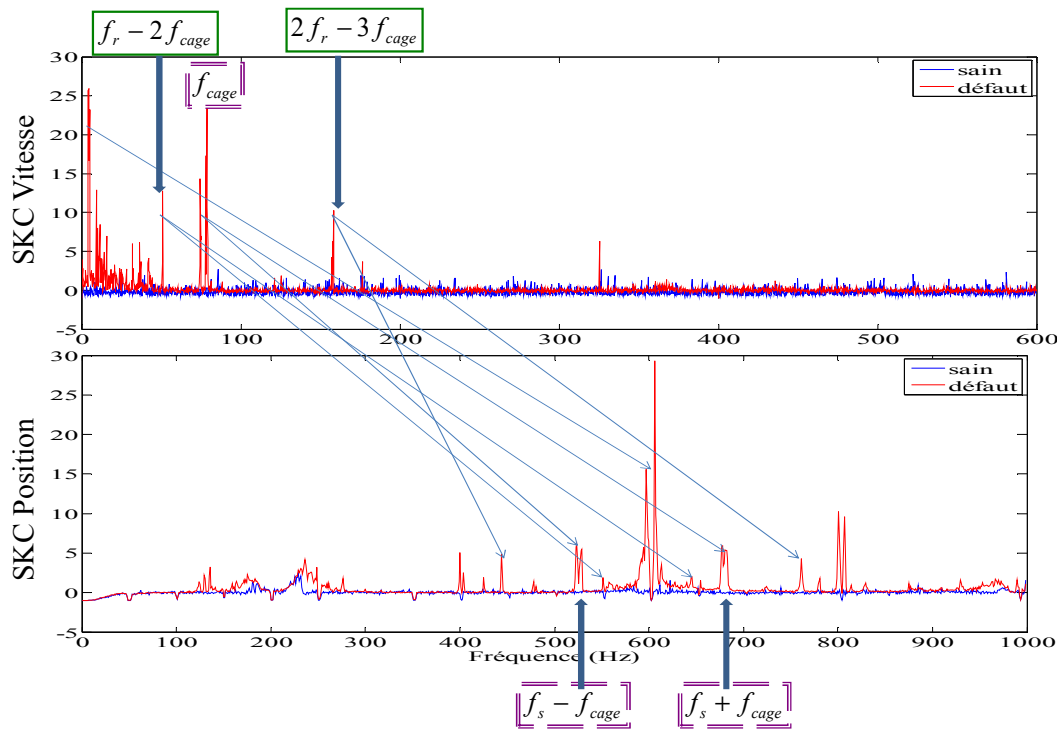


Figure 4-14 : Kurtosis Spectral de vitesse et de position à 12 000 tr/min

De plus, dans les zones fréquentielles de part et d'autre de 200Hz, 400Hz, 800Hz et 1000Hz (à savoir les familles $f_s \pm f_r \pm [0 \dots f_{BF}]$ et $f_s \pm 2f_r \pm [0 \dots f_{BF}]$), nous constatons bien l'existence d'harmoniques à caractère non stationnaire liés à la variation basse fréquence de la vitesse. Idem pour la famille $(2k + 1) \cdot f_s \pm [0 \dots f_{BF}]$ située pour $k = 0$ de chaque côté de 600 Hz. Nous montrons sur les figures suivantes le SK en sain et en défailant pour les différentes vitesses de fonctionnement.

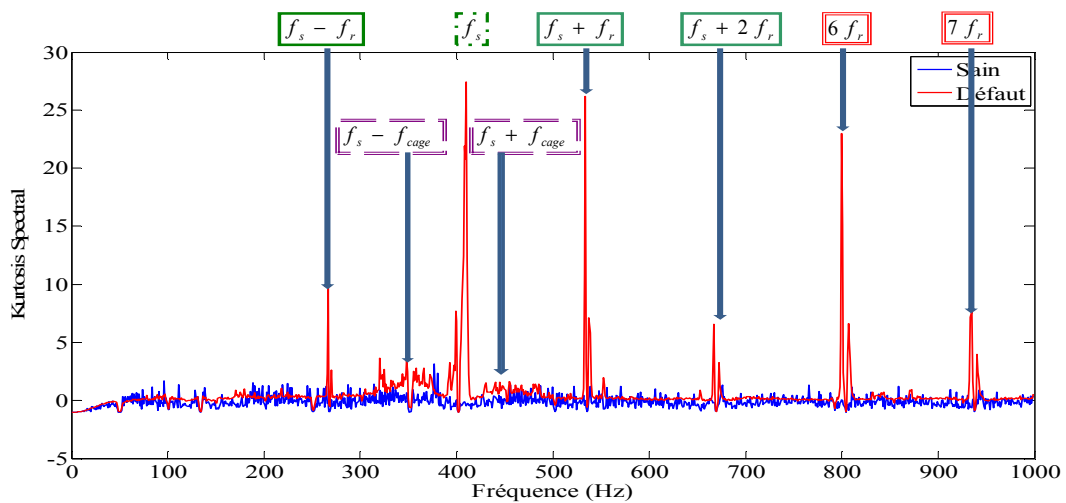


Figure 4-15 : Kurtosis Spectral de position à 8000 tr/min

Nous remarquons sur la figure 4-15, l'apparition d'harmoniques autour des fréquences $6f_r$ et $7f_r$. Ces phénomènes sont liés aux harmoniques à $kf_r \pm f_{osc}$, avec $f_{osc} = f_{BF}$ qui sont dus probablement au décalage d'un aimant.

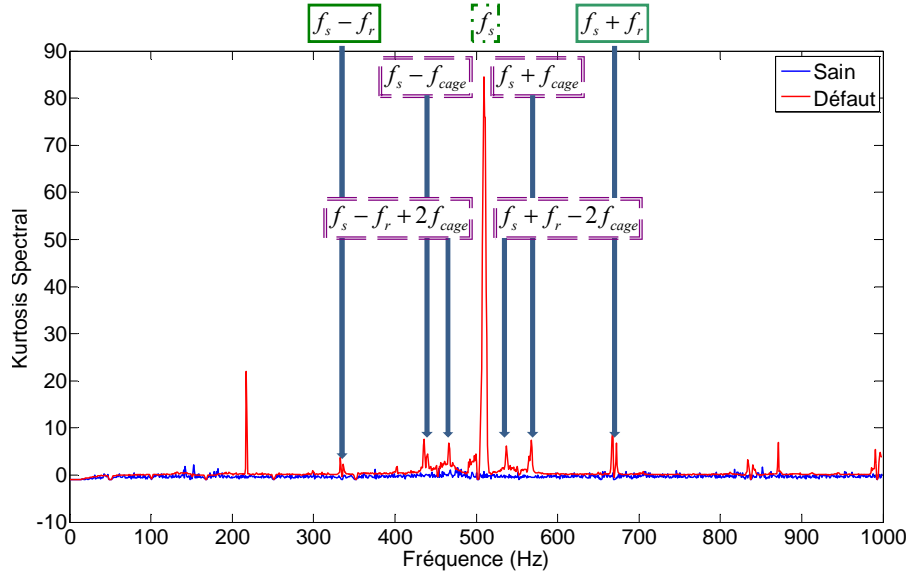


Figure 4-16 : Kurtosis Spectral de position à 10000 tr/min

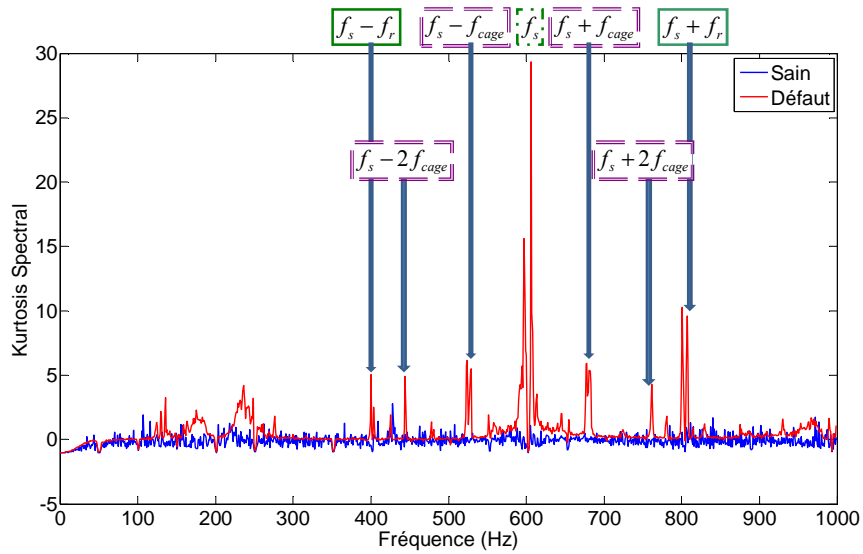


Figure 4-17 : Kurtosis Spectral de position à 12000 tr/min

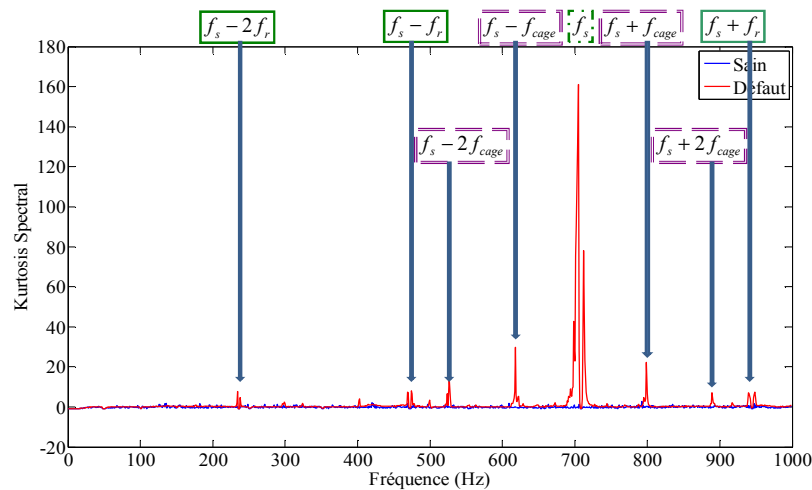


Figure 4-18 : Kurtosis Spectral de position à 14100 tr/min

Nous montrons dans le tableau 4-3, les harmoniques présents seulement en défaillant pour les différentes vitesses de fonctionnement.

Vitesse	Familles de fréquences				
8000 tr/mn	$f_s \pm f_{cage}$	$f_s \pm f_r \pm f_{BF}$	$f_s \pm f_{BF}$	$k f_r \pm f_{BF}$	
10 000 tr/mn	$f_s \pm f_{cage}$	$f_s \pm f_r \pm f_{BF}$	$f_s \pm f_{BF}$	$f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$	
12 000 tr/mn	$f_s \pm f_{cage}$	$f_s \pm f_r \pm f_{BF}$	$f_s \pm f_{BF}$	$f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$	
14 100 tr/mn	$f_s \pm f_{cage}$	$f_s \pm f_r \pm f_{BF}$	$f_s \pm f_{BF}$	$f_s \pm 2f_{cage}$	$f_s - 2f_r \pm f_{BF}$

Tableau 4-3 : Fréquences sensibles aux défauts de roulements pour les différentes vitesses de fonctionnement (SK position)

4.6 Kurtosis Spectral du signal courant statorique

Le spectre du signal de courant statorique fait apparaître en cas de défaut des harmoniques à $(6k \pm 1)f_s \pm f_{oscage}$ liés à la fréquence de cage, et n'existant pas en régime sain. Ces harmoniques devraient donc être visibles sur le SK du courant statorique. Les harmoniques liés à la fréquence de cage et attendus dans le SK du courant statorique pour $k = 0$ sont les mêmes que ceux listés dans le tableau 4-2. Rappelons que le SK de la vitesse fait apparaître en régime défaillant un ensemble d'harmoniques non stationnaires basse fréquence entre 0 et f_{BF} . Ces variations non stationnaires vont directement impacter toutes les fréquences liées à f_r présentes sur le signal courant statorique. Ainsi toute harmonique à une fréquence f_h liée à f_r , se retrouvera dans le SK du courant statorique sous la forme $f_h \pm [0 \dots f_{BF}]$. Ce sera le cas pour les harmoniques du tableau 4-2. Par exemple, à $f_h = f_s \pm f_{cage}$ correspondra une zone de variation fréquentielle à $f_s \pm f_{cage} \pm [0 \dots f_{BF}]$.

De la même manière, les harmoniques liées aux oscillations de vitesse à f_r et $2f_r$ sont présents dans le spectre de courant statorique sous la forme $f_h = (6k \pm 1) \cdot f_s \pm f_r$ et $f_h = (6k \pm 1) \cdot f_s \pm 2f_r$. Ils existent cependant à la fois en régime sain et en régime défaillant et devraient donc apparaître dans le SK de courant statorique avec une amplitude négative tendant vers -1. Nous devrions donc pouvoir observer sur le SK de courant statorique les effets de la non stationnarité basse fréquence de la vitesse autour des fréquences $(6k \pm 1) \cdot f_s \pm f_r \pm [0 \dots f_{BF}]$ et $(6k \pm 1) \cdot f_s \pm 2f_r \pm [0 \dots f_{BF}]$. La variation basse fréquence de f_r concerne également les fréquences fondamentales du signal position, d'où la présence des familles $(6k \pm 1) \cdot f_s \pm [0 \dots f_{BF}]$.

Les figures suivantes montrent le Kurtosis Spectral du courant statorique pour deux enregistrements sain et défaillant, pour différentes vitesses de fonctionnement. Nous y remarquons qu'il est plus difficile de détecter les harmoniques des familles théoriques.

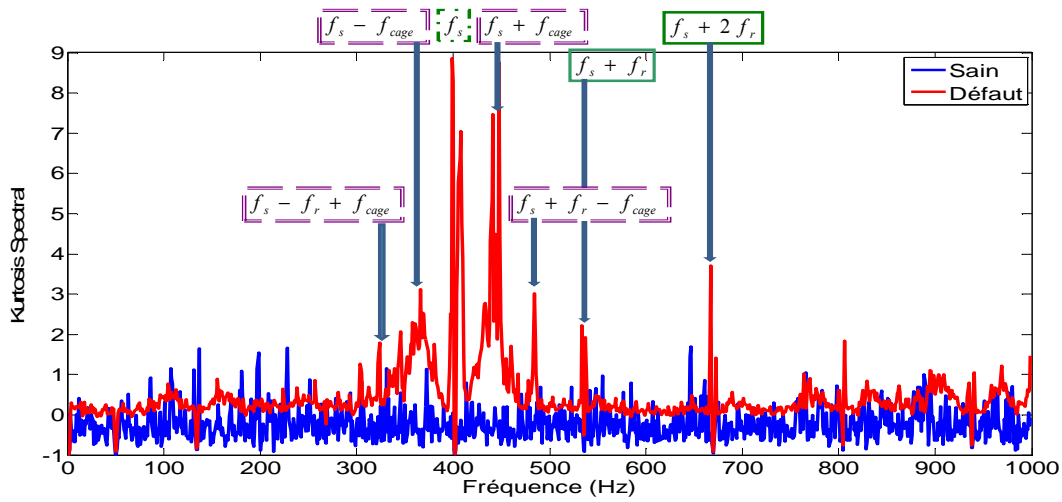


Figure 4-19 : Kurtosis Spectral de courant à 8000 tr/min

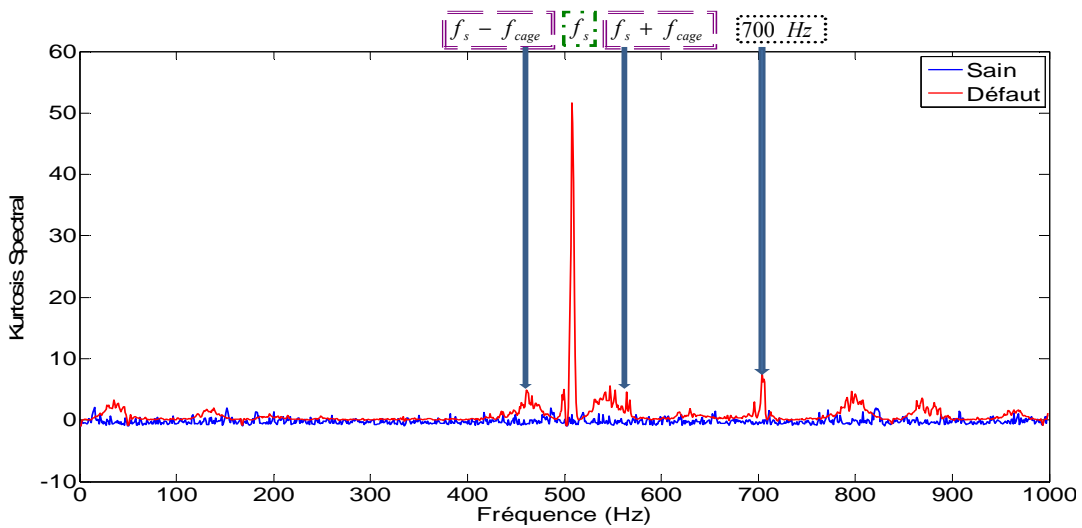


Figure 4-20 : Kurtosis Spectral de courant à 10 000 tr/min

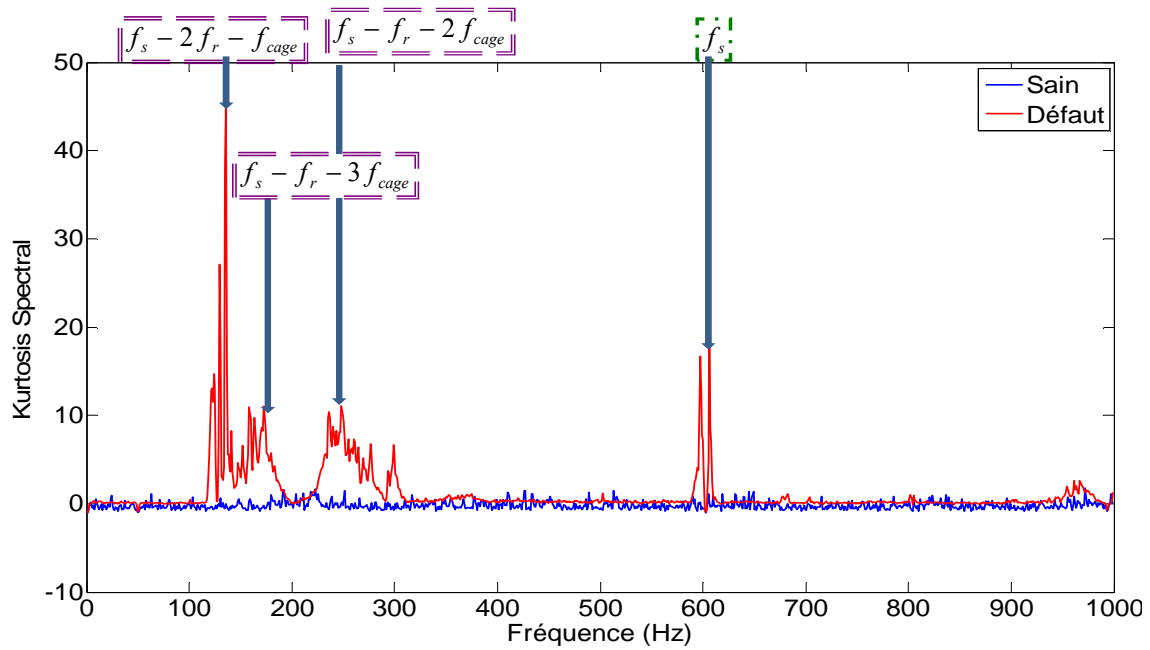


Figure 4-21 : Kurtosis Spectral de courant à 12 000 tr/min

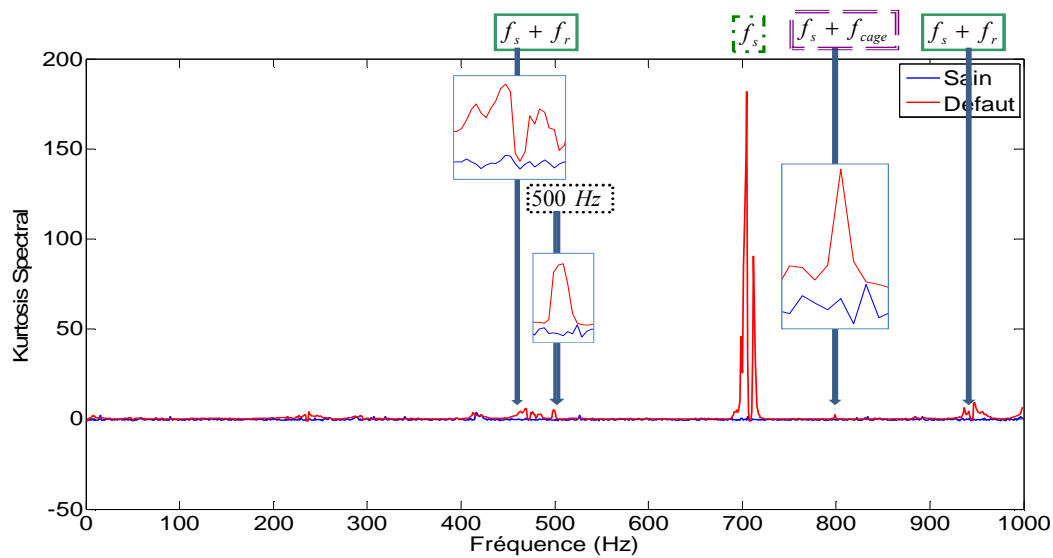


Figure 4-22 : Kurtosis Spectral de courant à 14 100 tr/min

Nous remarquons que l'harmonique à $f_s \pm [0 \dots f_{BF}]$ qui provient de la famille $(6k \pm 1) \cdot f_s \pm [0 \dots f_{BF}]$ est présent en défaut pour les différentes vitesses de fonctionnement. Pour les autres familles d'harmoniques attendus en régime de défaut, nous constatons qu'ils ne sont pas présents pour toutes les vitesses de fonctionnement. Les harmoniques 700 Hz à 10 000 tr/min et 500 Hz à 14 100 tr/min représentent, rappelons-le, le défaut électrique expliqué au paragraphe 3.8. Nous montrons sur le tableau 4-4 les harmoniques présents seulement en régime défaillant pour les différentes vitesses de fonctionnement.

Vitesse	Familles de fréquences
8000 tr/mn	$f_s \pm f_{cage}$ $f_s + f_r \pm f_{BF}$ $f_s \pm f_{BF}$ $kf_r \pm f_{BF}$ $f_s + 2f_r \pm f_{BF}$ $f_s \pm (f_r - f_{cage})$
10 000 tr/mn	$f_s \pm f_{cage}$ $f_s \pm f_{BF}$
12 000 tr/mn	$f_s \pm f_{BF}$ $f_s - (f_r + 2f_{cage})$ $f_s - (2f_r + f_{cage})$ $f_s - (f_r + 3f_{cage})$
14 100 tr/mn	$f_s + f_{cage}$ $f_s \pm f_r \pm f_{BF}$ $f_s \pm f_{BF}$

Tableau 4-4 : Fréquences sensibles aux défauts de roulement pour les différentes vitesses de fonctionnement (SK courant statorique)

4.7 Kurtosis spectral du signal courant onduleur

Le spectre du signal de courant onduleur fait apparaître en cas de défaut des harmoniques à $6kf_s \pm f_{osc_{cage}}$, liés à la fréquence de cage et n'existant pas en régime sain. Ces harmoniques devraient être présents sur le SK du courant onduleur. Rappelons qu'un harmonique à une fréquence f_h liée à f_r , se retrouvera dans le SK du courant statorique sous la forme $f_h \pm [0 \dots f_{BF}]$. Par exemple, on aura pour $f_h = 6f_s \pm f_{cage}$ une zone de variation fréquentielle à $6f_s \pm f_{cage} \pm [0 \dots f_{BF}]$.

De la même manière, les harmoniques liées aux oscillations de vitesse à f_r et $2f_r$ existent dans le spectre de courant onduleur sous la forme $f_h = 6f_s \pm f_r$ et $f_h = 6f_s \pm 2f_r$. Ils sont cependant présents à la fois en régime sain et en régime défaillant et devraient donc figurer dans le SK de courant onduleur avec une amplitude négative tendant vers -1. Le SK du courant onduleur doit inclure les effets de la non stationnarité basse fréquence de la vitesse autour des fréquences $6f_s \pm f_r \pm [0 \dots f_{BF}]$ et $6f_s \pm 2f_r \pm [0 \dots f_{BF}]$. La variation basse fréquence de f_r concerne également les fréquences fondamentales du signal position, d'où la présence des familles $6f_s \pm [0 \dots f_{BF}]$.

Nous montrons sur la Figure 4-23 la comparaison entre un courant onduleur issu d'un enregistrement sain et un autre issu d'un enregistrement défaillant à la vitesse 8000 tr/min pour une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz et une taille d'observation de 2^{13} points (idem pour Figure 4-24 à la vitesse 10 000 tr/min, Figure 4-25 à la vitesse 12 000 tr/min et Figure 4-26 à la vitesse 14 100 tr/min). Le choix du paramètre fréquence d'échantillonnage à 10 kHz est effectué pour garantir l'observation de l'harmonique à $6kf_s$ ($k = 1$) aux différentes vitesses de fonctionnement. Le choix d'une taille d'observation de 2^{13} permet de garantir une excursion fréquentielle de l'ordre de 1 Hz.

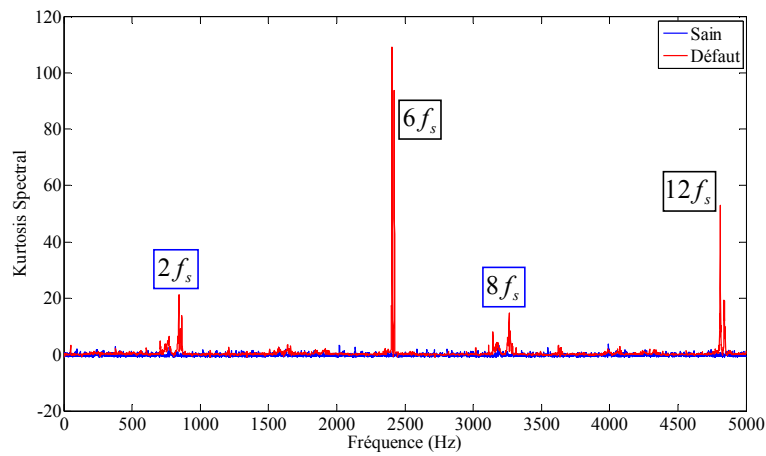


Figure 4-23 : Kurtosis Spectral du courant onduleur à 8000 tr/min

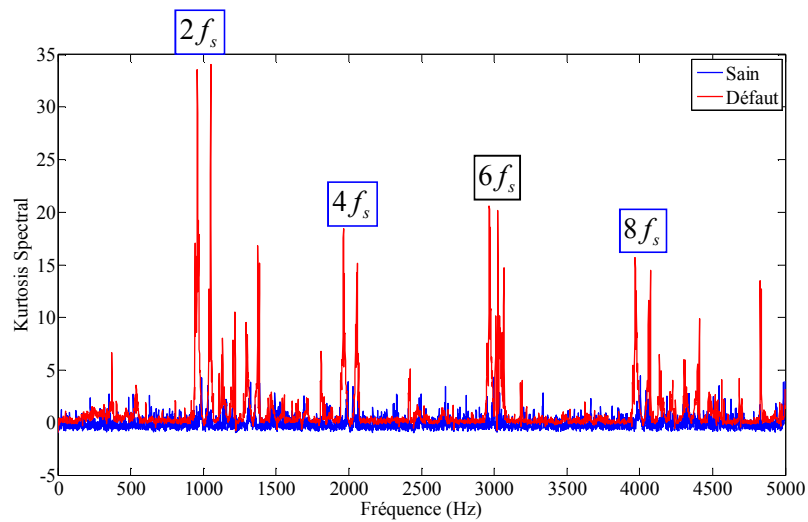


Figure 4-24 : Kurtosis Spectral du courant onduleur à 10 000 tr/min

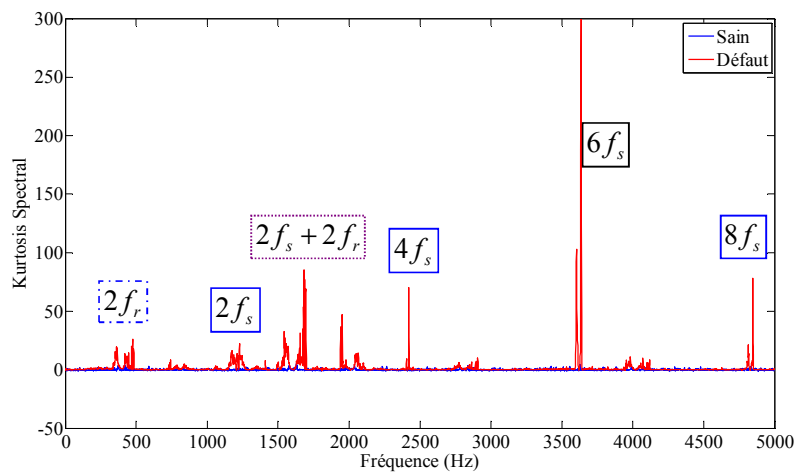


Figure 4-25 : Kurtosis Spectral du courant onduleur à 12 000 tr/min

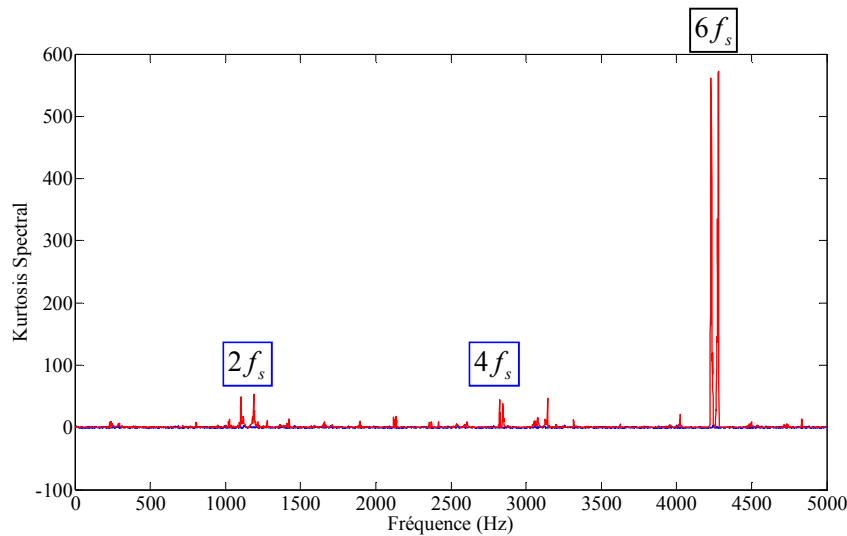


Figure 4-26 : Kurtosis Spectral du courant onduleur à 14 100 tr/min

Nous remarquons sur ces figures que les harmoniques qui sont les plus présents dans le SK du signal défaillant sont ceux de la famille $6kf_s$ et $2kf_s$, en indiquant la présence d'une non stationnarité liée à une modulation basse fréquence (la présence de deux harmoniques autour de $6kf_s$) et la présence d'un décalage d'un capteur de position (l'apparition des harmoniques à $2kf_s$). Pour les autres harmoniques notamment à $6f_s \pm f_r$ et $6f_s \pm f_{cage}$, nous remarquons qu'ils sont moins présents dans le SK du courant onduleur. Nous montrons, dans le tableau 4-5, les harmoniques présents seulement en défaillant pour les différentes vitesses de fonctionnement.

Vitesse	Familles de fréquences					
8000 tr/mn	$2f_s \pm f_{BF}$		$6f_s \pm f_{BF}$		$8f_s \pm f_{BF}$	
10 000 tr/mn	$2f_s \pm f_{BF}$		$4f_s \pm f_{BF}$		$6f_s \pm f_{BF}$	
12 000 tr/mn	$2f_s \pm f_{BF}$	$4f_s \pm f_{BF}$	$6f_s \pm f_{BF}$	$8f_s \pm f_{BF}$	$2f_r \pm f_{BF}$	$2f_s + 2f_r \pm f_{BF}$
14 100 tr/mn	$2f_s \pm f_{BF}$		$4f_s \pm f_{BF}$		$6f_s \pm f_{BF}$	

Tableau 4-5 : Fréquences sensibles aux défauts de roulement pour les différentes vitesses de fonctionnement (SK courant onduleur)

Conclusion sur l'usage du Kurtosis spectral

Le SK présente donc l'avantage de distinguer dans un signal, les composantes stationnaires de celles qui ne le sont pas. Nous constatons que des signatures spécifiques aux défauts de roulements apparaissent lorsque que l'on analyse les signaux dont nous disposons avec cet outil. Les composantes non stationnaires qui permettent de détecter le Kurtosis spectral peuvent être reliées aux défauts de roulements en étudiant les fréquences qui les caractérisent. Le tableau 4-6 montre les harmoniques présents dans le SK pour chaque vitesse étudiée, pour les différents signaux (vitesse, position, courant statique et courant d'onduleur).

8000	Vitesse	f_{cage}	$f_r - 2f_{cage}$	f_{BF}	$f_r - f_{cage}$
	Position	$f_s \pm f_{cage}$	$f_s \pm f_r \pm f_{BF}$	$f_s \pm f_{BF}$	$kf_r \pm f_{BF}$
	Courant statorique	$f_s \pm f_{cage}$	$f_s + f_r \pm f_{BF}$ f_{BF}	$f_s \pm f_{BF}$ $f_s \pm (f_r - f_{cage})$	$kf_r \pm f_{BF}$ $f_s + 2f_r \pm$
	Courant onduleur	$2f_s \pm f_{BF}$	$6f_s \pm f_{BF}$	$8f_s \pm f_{BF}$	$12f_s \pm f_{BF}$
10 000	Vitesse	f_{cage}	$f_r - 2f_{cage}$		
	Position	$f_s \pm f_{cage}$	$f_s \pm f_r \pm f_{BF}$	$f_s \pm f_{BF}$	$f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$
	Courant statorique	$f_s \pm f_{cage}$	$f_s \pm f_{BF}$	700 Hz (origine défaut électrique)	
	Courant onduleur	$2f_s \pm f_{BF}$	$4f_s \pm f_{BF}$	$6f_s \pm f_{BF}$	$8f_s \pm f_{BF}$
12 000	Vitesse	f_{cage}	$f_r - 2f_{cage}$	f_{BF}	$2f_r - 3f_{cage}$
	Position	$f_s \pm f_{cage}$	$f_s \pm f_r \pm f_{BF}$	$f_s \pm f_{BF}$	$f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$
	Courant statorique	$f_s \pm f_{BF}$	$f_s - (f_r + 2f_{cage})$	$f_s - (2f_r + f_{cage})$	$f_s - (f_r + 3f_{cage})$
	Courant onduleur	$2f_s \pm f_{BF}$	$4f_s \pm f_{BF}$ $2f_r \pm f_{BF}$	$6f_s \pm f_{BF}$ $2f_s + 2f_r \pm f_{BF}$	$8f_s \pm f_{BF}$
14 100	Vitesse	f_{cage}	$f_r - 2f_{cage}$	f_{BF} $3f_{cage} - f_r$	$2f_r - 3f_{cage}$ $2f_{cage}$
	Position	$f_s \pm f_{cage}$	$f_s \pm f_r \pm f_{BF}$	$f_s \pm f_{BF}$ $2f_r \pm f_{BF}$	$f_s \pm 2f_{cage}$ $f_s -$
	Courant statorique	$f_s + f_{cage}$	$f_s \pm f_r \pm f_{BF}$	$f_s \pm f_{BF}$ électrique)	500 Hz (origine défaut
	Courant onduleur	$2f_s \pm f_{BF}$	$4f_s \pm f_{BF}$	$6f_s \pm f_{BF}$	

Tableau 4-6 : Harmoniques de SK pour les différents signaux et les différentes vitesses en cas de défaut

Le tableau 4-7 indique les harmoniques présents dans le SK pour les signaux vitesse, position et courant statorique et courant d'onduleur et communs pour toutes les vitesses étudiées.

Vitesse	f_{cage}		
Position	$(2k + 1)f_s \pm f_r \pm f_{BF}$	$(2k + 1)f_s \pm f_{BF}$	$(2k + 1)f_s \pm f_{cage}$
Courant statorique	$(6k \pm 1)f_s \pm f_r \pm f_{BF}$	$(6k \pm 1)f_s \pm f_{BF}$	$(6k \pm 1)f_s \pm f_{cage}$
Courant onduleur	$2f_s \pm f_{BF}$	$4f_s \pm f_{BF}$	$6f_s \pm f_{BF}$

Tableau 4-7 : Harmoniques de SK communs pour toutes les vitesses en cas de défaut

Cette partie nous a permis de présenter l'outil Kurtosis Spectral et son emploi sur les différents signaux électriques et mécaniques à disposition sur l'équipement. L'intérêt des signaux mécaniques (vitesse, position) par rapport aux signaux électriques (courants) a particulièrement été mis en évidence. Nous présentons dans la suite de ce travail des techniques automatisées pour construire des indicateurs exploitant ces représentations, qui seront également appliquées sur les deux types de signaux.

4.8 Construction des indicateurs exploitant le Kurtosis Spectral

Les signaux étudiés sont sous-échantillonnés à la fréquence désirée, puis découpés en sous-signaux de taille n . Les paramètres sont choisis pour avoir un calcul rapide du SK et une taille mémoire limitée permettant de favoriser une implantation ultérieure en temps réel. Nous calculons la FFT du signal à étudier et nous obtenons la fonction $H(n_i, kF)$. Le Kurtosis spectral est cumulé sur tous les enregistrements jusqu'à l'arrêt de la machine. Pour chaque observation, l'indicateur est calculé par l'expression (4-19).

$$Ind(N) = \sum_{f_i=0}^{f_{Max}} SK(f_i)^2 \text{ pour les } SK(f_i) > 0 \quad (4-19)$$

où N est le numéro de la réalisation et f_i sont les fréquences de zéro à la fréquence f_{Max} .

Le choix du calcul de l'indicateur dans (4-19) vient de la connaissance a priori des valeurs du Kurtosis spectral pour certains harmoniques. En effet, pour un harmonique présent continuellement dans tous les spectres FFT du signal considéré, la valeur dans le SK sera égale à -1 (composante stationnaire). Dans le calcul de l'indicateur, nous ne retenons donc que les valeurs positives du Kurtosis Spectral. De plus, nous savons que le Kurtosis spectral d'un bruit blanc gaussien est proche de zéro, (voir paragraphe 4.2.3), en élevant les valeurs du Kurtosis spectral au carré, nous améliorons le rapport signal sur bruit en affaiblissant l'influence de toutes les valeurs qui sont comprises entre zéro et un, valeurs supposées liées au bruit.

4.8.1 Application de l'indicateur Kurtosis Spectral Cumulé sur les signaux étudiés

Commençons par le calcul de l'indicateur SK de vitesse avec les paramètres suivants :

- Une fréquence d'échantillonnage égale à deux fois la fréquence statorique :

$$f_e(v) = 2 \times N_c \times 3 \times \frac{v}{60}$$

avec N_c est le nombre de capteurs de position utilisés pour reconstruire la vitesse

- Un pas fréquentiel de 0.25 Hz.

L'indicateur est calculé pour les fréquences depuis zéro jusqu'à 1 kHz pour les signaux courant statorique et position et pour les fréquences depuis zéro jusqu'à la fréquence statorique pour le signal vitesse. Nous avons choisi de construire l'indicateur SK entre zéro et 5 kHz pour le signal courant onduleur puisque les harmoniques étudiés pour ce signal seront à $6kf_s$ avec $k=1$. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4-27 pour l'indicateur SK sur le signal vitesse, sur la figure 4-28 pour le signal position, sur la figure 4-29 pour le signal courant statorique et sur la figure 4-30 pour le signal courant onduleur.

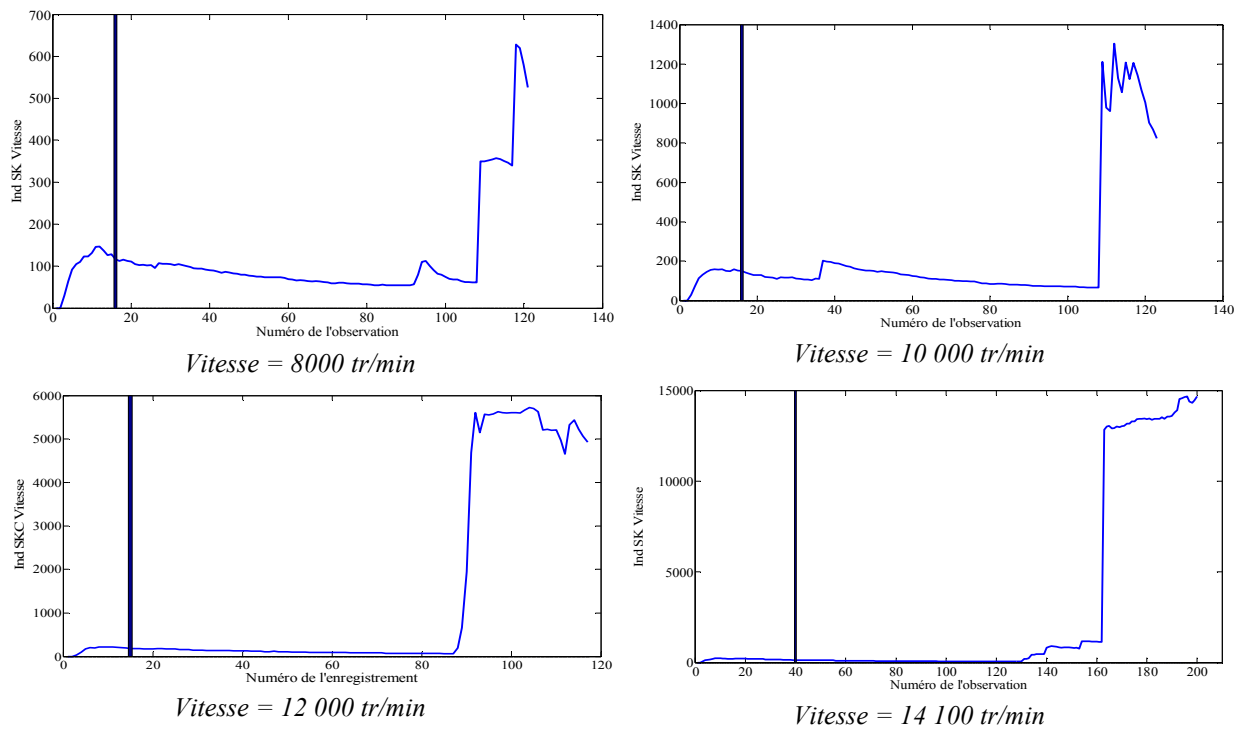


Figure 4-27 : Indicateur Kurtosis Spectral de vitesse

4.8 Construction des indicateurs exploitant le Kurtosis Spectral

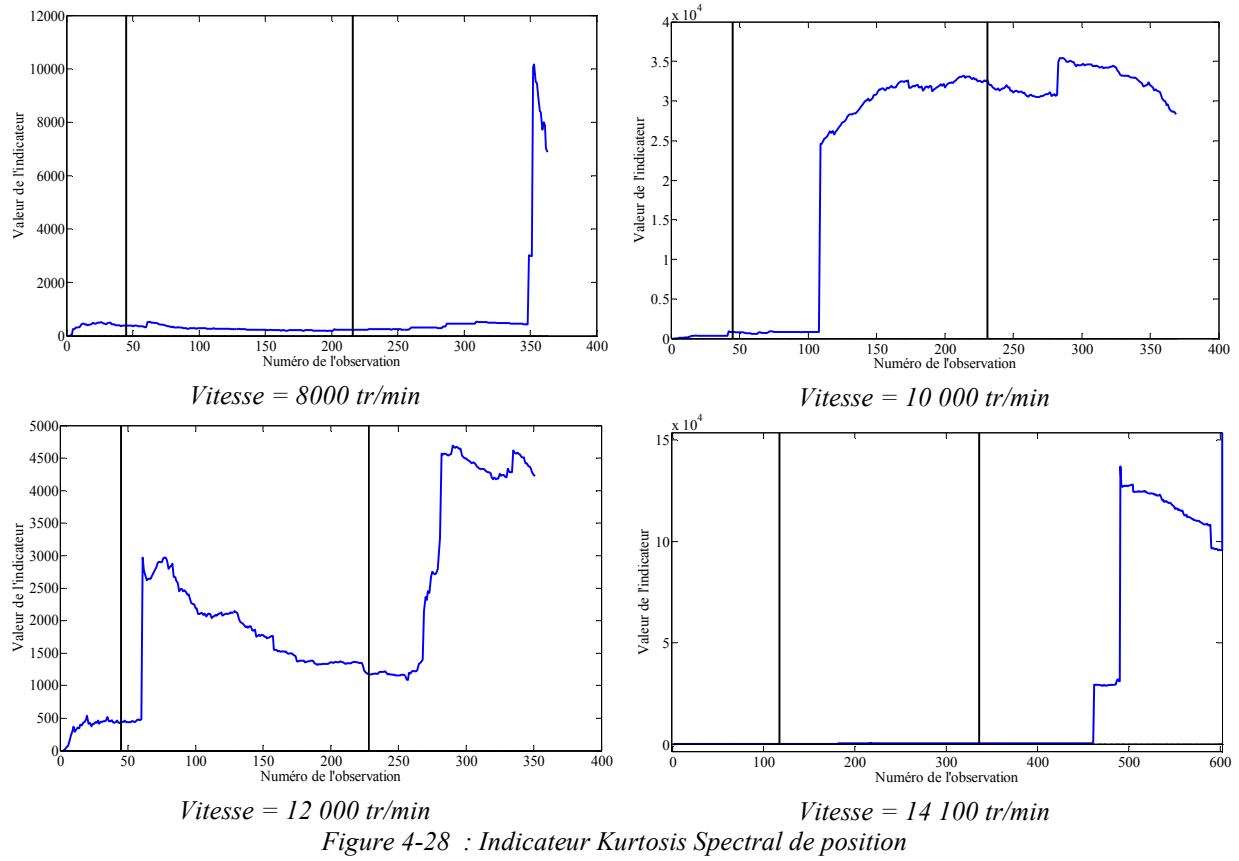


Figure 4-28 : Indicateur Kurtosis Spectral de position

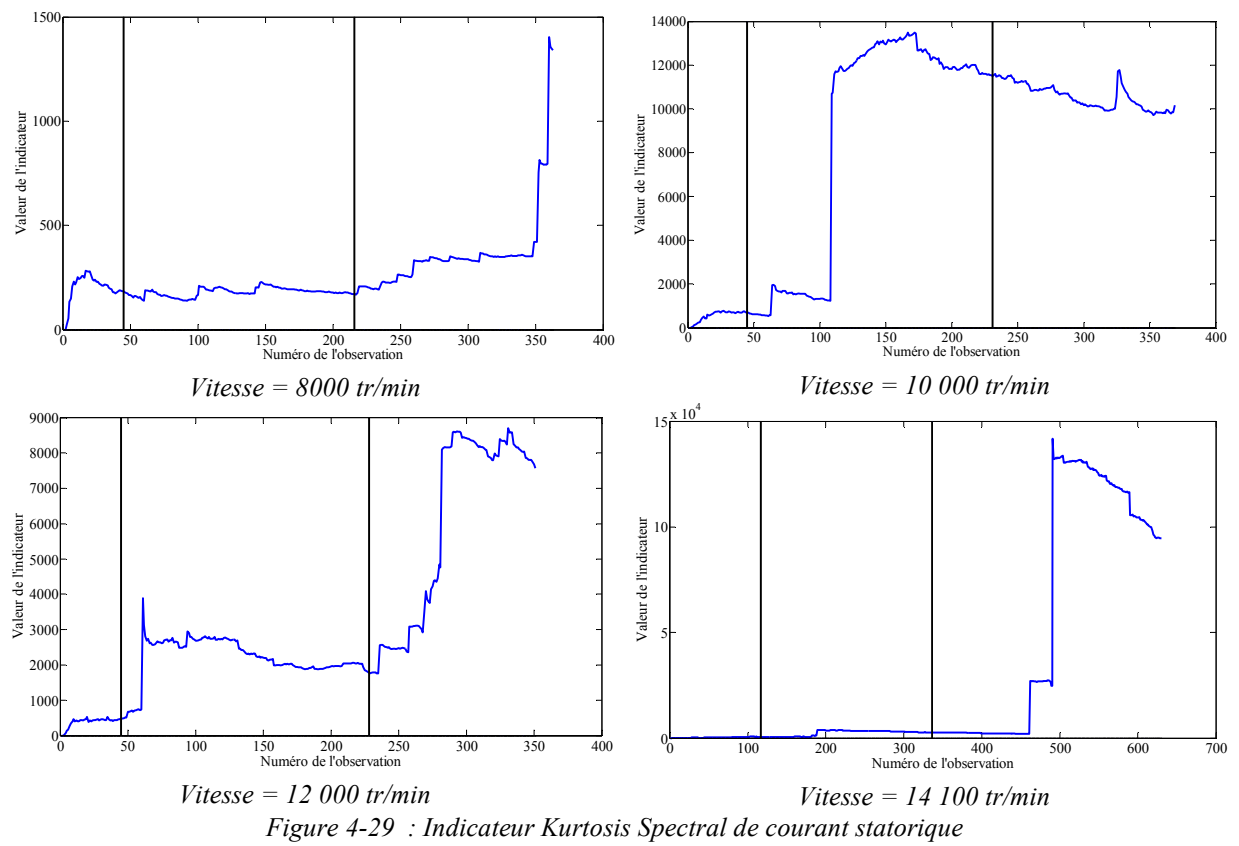


Figure 4-29 : Indicateur Kurtosis Spectral de courant statorique

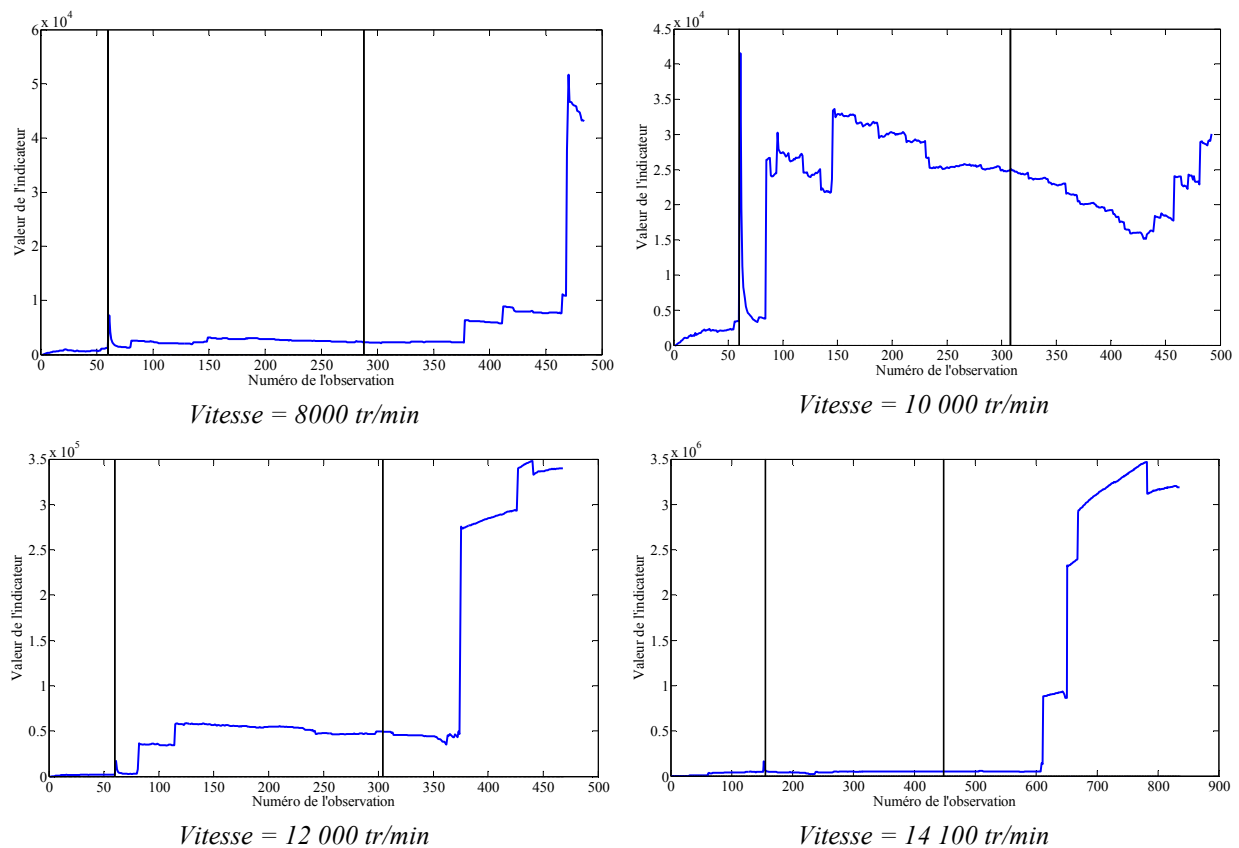


Figure 4-30 : Indicateur Kurtosis Spectral de courant onduleur

Pour le signal vitesse, l'indicateur ne réagit qu'à la fin de vie du roulement (les deux derniers jours), contrairement aux autres signaux. De plus, nous remarquons que l'indicateur SK de vitesse offre une bonne séparation entre les régimes sain et défaillant pour les différentes vitesses de fonctionnement.

Pour le signal position, (idem courant statorique et courant onduleur) l'indicateur réagit avant l'indicateur vibratoire pour les vitesses 10 000 tr/min et 12 000 tr/min. Ceci n'est pas forcément lié au défaut mécanique surveillé, comme le défaut de circlip et de flasque évoqué au paragraphe 3.8. En général tous les indicateurs SK offrent une bonne séparation entre cas sain et cas défaillant. Attention toutefois au fait que construire l'indicateur à partir du SK global, peut entraîner une réaction de l'indicateur à des phénomènes autres que les défauts liés à la dégradation des roulements.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons plus particulièrement cibler les indicateurs SK sur des fréquences liées aux phénomènes mécaniques comme la fréquence de cage, c'est-à-dire opérer une sélection de fréquences pour centre nos indicateurs sur celles qui sont les plus contributives au diagnostic de défauts.

4.9 Kurtosis Spectral avec sélection de fréquences

Jusqu'à maintenant, nous avons construit un indicateur exploitant l'ensemble des spectres, c'est-à-dire la totalité du Kurtosis spectral cumulé, de sorte que toutes les bandes fréquentielles contribuent à l'évolution de l'indicateur. Dans ce paragraphe, le Kurtosis Spectral est évalué dans des bandes fréquentielles sélectionnées à partir des connaissances a priori du contenu des SK des signaux étudiés.

En utilisant les résultats obtenus dans les paragraphes 4.4 (SK vitesse), 4.5 (SK position), 4.6 (SK courant statorique) et 4.7 (SK courant onduleur), nous construisons des indicateurs ciblés sur des fréquences spécifiques pour chaque signal (voir rappel). L'idée donc est de calculer le Kurtosis Spectral seulement sur ces fréquences avec une fréquence de balayage de ± 10 Hz.

Rappel :

Vitesse	f_{cage} $f_r - 2f_{cage}$		
Position	$(2k + 1)f_s \pm f_r \pm f_{BF}$	$(2k + 1)f_s \pm f_{BF}$	$(2k + 1)f_s \pm f_{cage}$
Courant statorique	$(6k \pm 1)f_s \pm f_r \pm f_{BF}$	$(6k \pm 1)f_s \pm f_{BF}$	$(6k \pm 1)f_s \pm f_{cage}$
Courant onduleur	$2f_s \pm f_{BF}$	$4f_s \pm f_{BF}$	$6f_s \pm f_{BF}$

4.9.1 Indicateur Kurtosis Spectral de vitesse

L'indicateur SK de vitesse est appliqué sur les fréquences f_{cage} et $f_r - 2f_{cage}$. Les figures suivantes (figure 4-31 et figure 4-32) représentent les indicateurs obtenus pour les différentes vitesses de fonctionnement. Nous remarquons sur ces figures que l'indicateur SK appliqué à la fréquence de cage offre une bonne détection du défaut deux jours avant la panne totale de la machine pour les différentes vitesses de fonctionnement.

Chapitre 4: Construction d'indicateurs statistiques utilisant le Kurtosis Spectral pour la détection de défauts de roulements

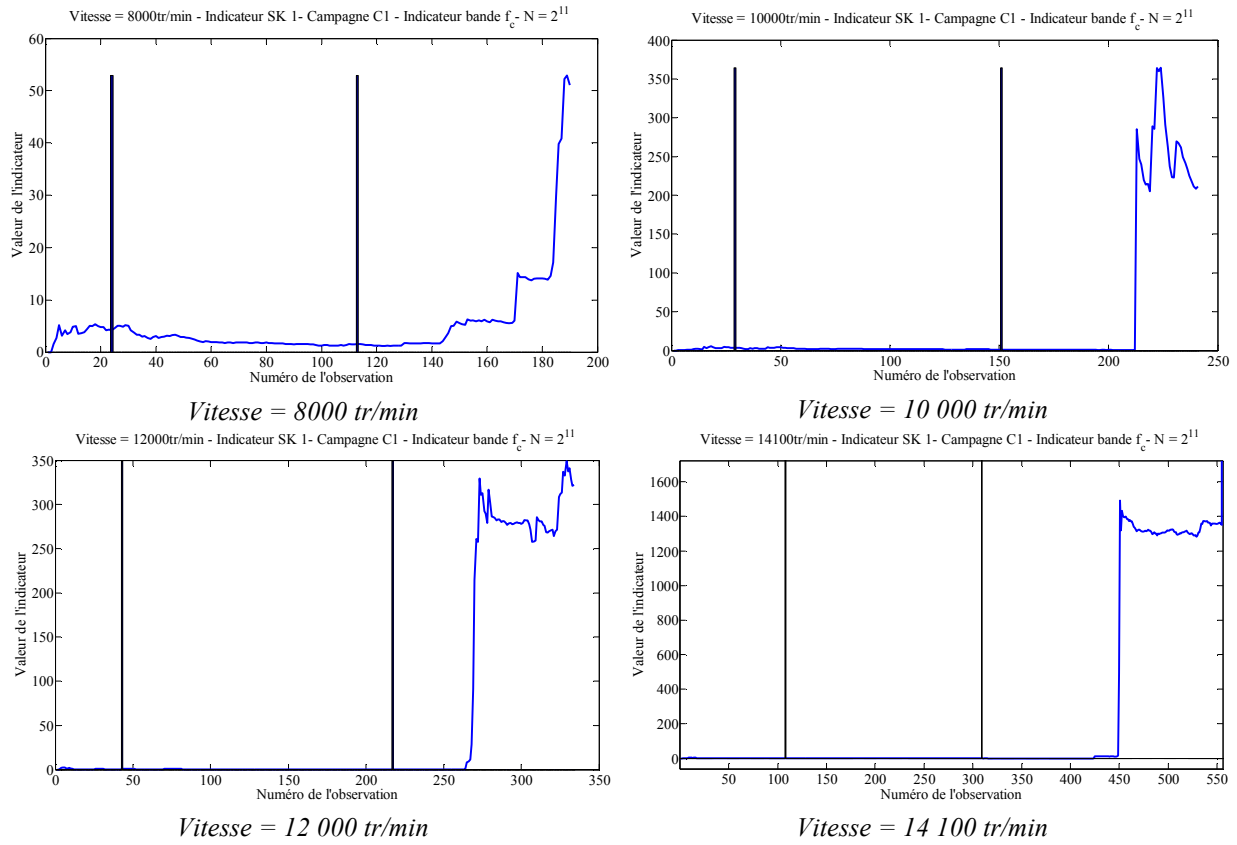


Figure 4-31 : SKC vitesse à f_{cage}

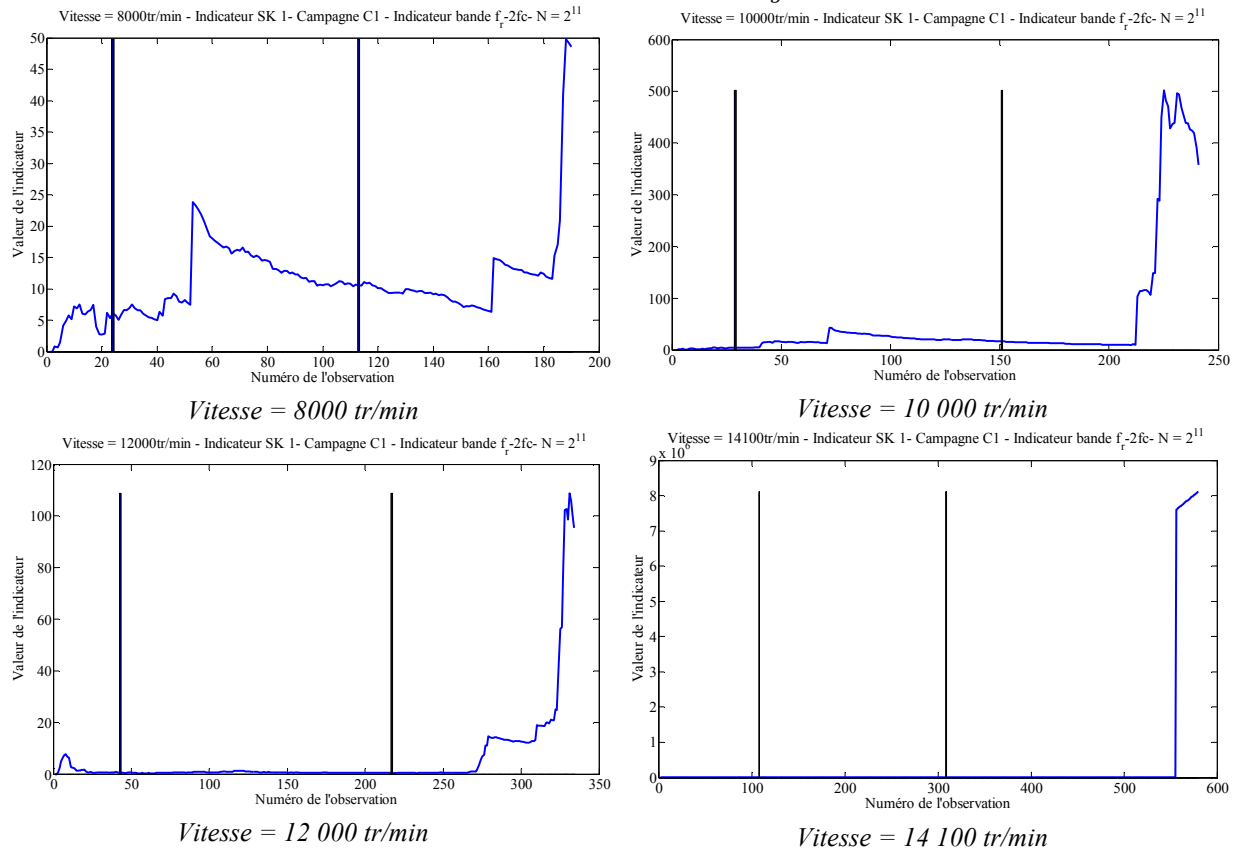
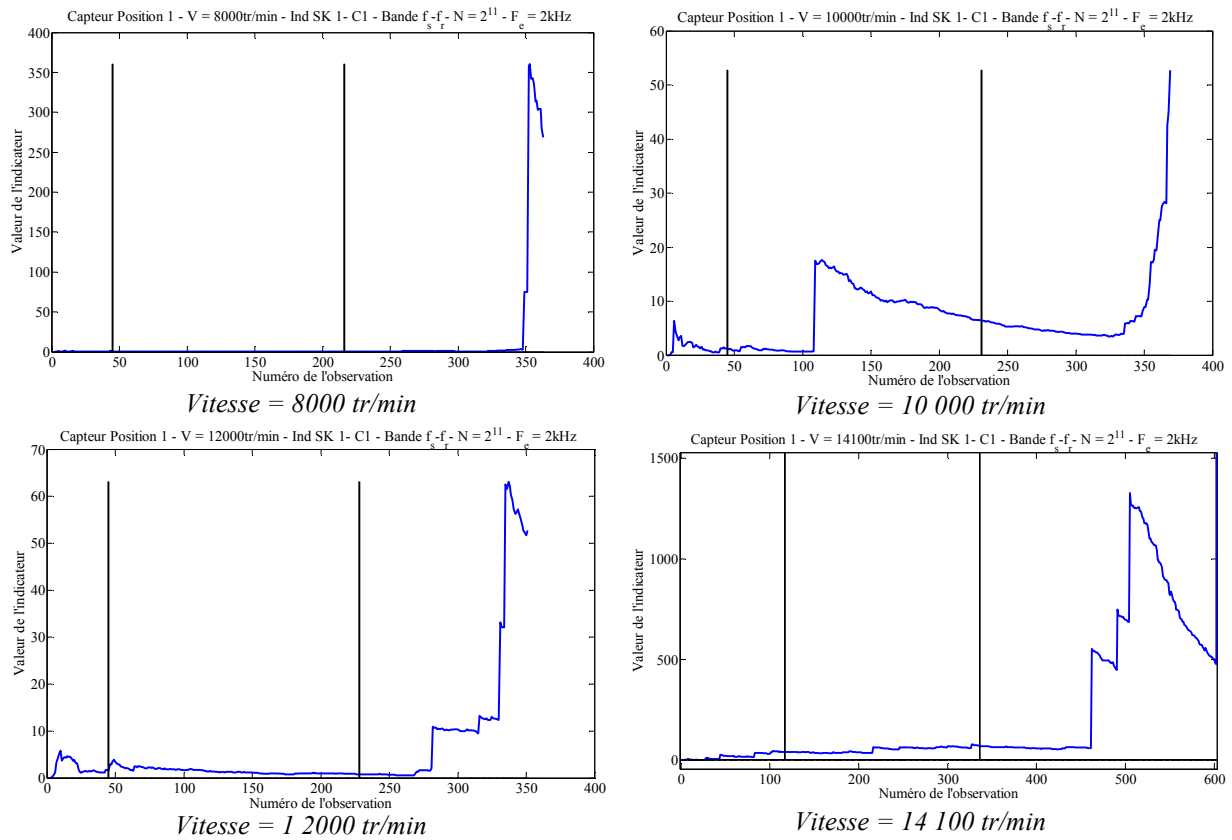


Figure 4-32 : indicateur SKC vitesse à $f_r - 2f_{cage}$

Le fait que l'indicateur SK réagisse plus tard à la vitesse 8000 tr/min est lié au faible nombre d'enregistrements. En effet, pour la campagne n°1, nous n'avons pour cette vitesse que quelques enregistrements au cours des 2 derniers jours d'acquisition. Nous remarquons aussi un bon niveau de séparation entre les valeurs des indicateurs SK correspondant aux enregistrements sains et défaillants. Globalement comparée aux indicateurs énergétiques, la séparation sain/défaut est améliorée en utilisant l'indicateur SK. En terme de fréquences sélectionnées, nous remarquons que les deux harmoniques choisis (f_{cage} et $f_r - 2f_{cage}$) offrent une bonne détection du défaut, avec un meilleur niveau de séparation en utilisant la fréquence f_{cage} .

4.9.2 Indicateur Kurtosis Spectral de position

D'après le tableau 4-7, les harmoniques sensibles au défaut et communs pour toutes les vitesses de fonctionnement dans le spectre de position sont à $(2k + 1).f_s \pm f_{BF}$, $(2k + 1).f_s \pm f_r \pm f_{BF}$ et $(2k + 1).f_s \pm f_{cage}$. Les figures suivantes montrent le SK du signal position pour $k = 0$ sur les fréquences $f_s \pm f_{BF}$, $f_s \pm f_r \pm f_{BF}$ et $f_s \pm f_{cage}$ pour les différentes vitesses de fonctionnement (figure 4-33 pour la fréquence $f_s - f_r \pm f_{BF}$, figure 4-34 pour la fréquence $f_s + f_r \pm f_{BF}$, figure 4-35 pour la fréquence $f_s - f_{cage}$, figure 4-36 pour la fréquence $f_s + f_{cage}$, et figure 4-37 pour la fréquence $f_s \pm f_{BF}$).



Chapitre 4: Construction d'indicateurs statistiques utilisant le Kurtosis Spectral pour la détection de défauts de roulements

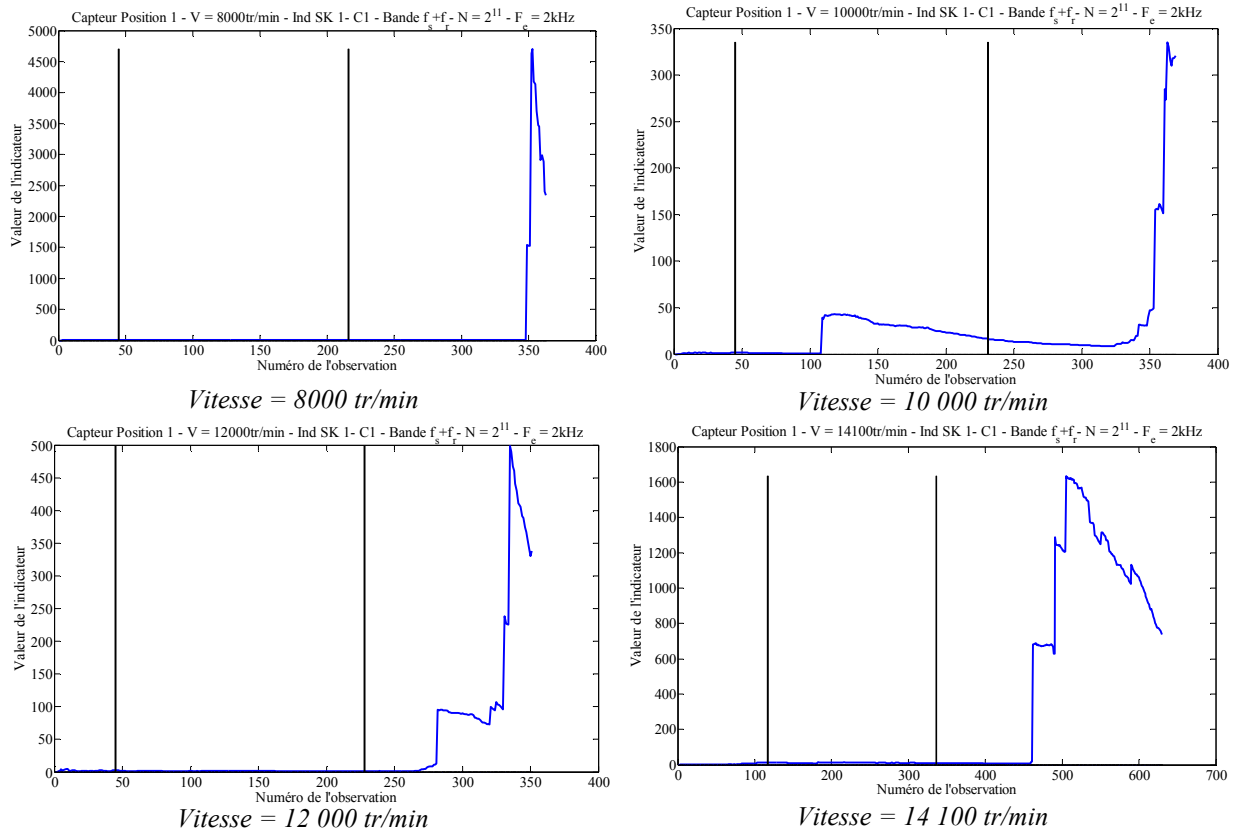


Figure 4-34 : indicateur SKC position à $f_s + f_r \pm f_{BF}$

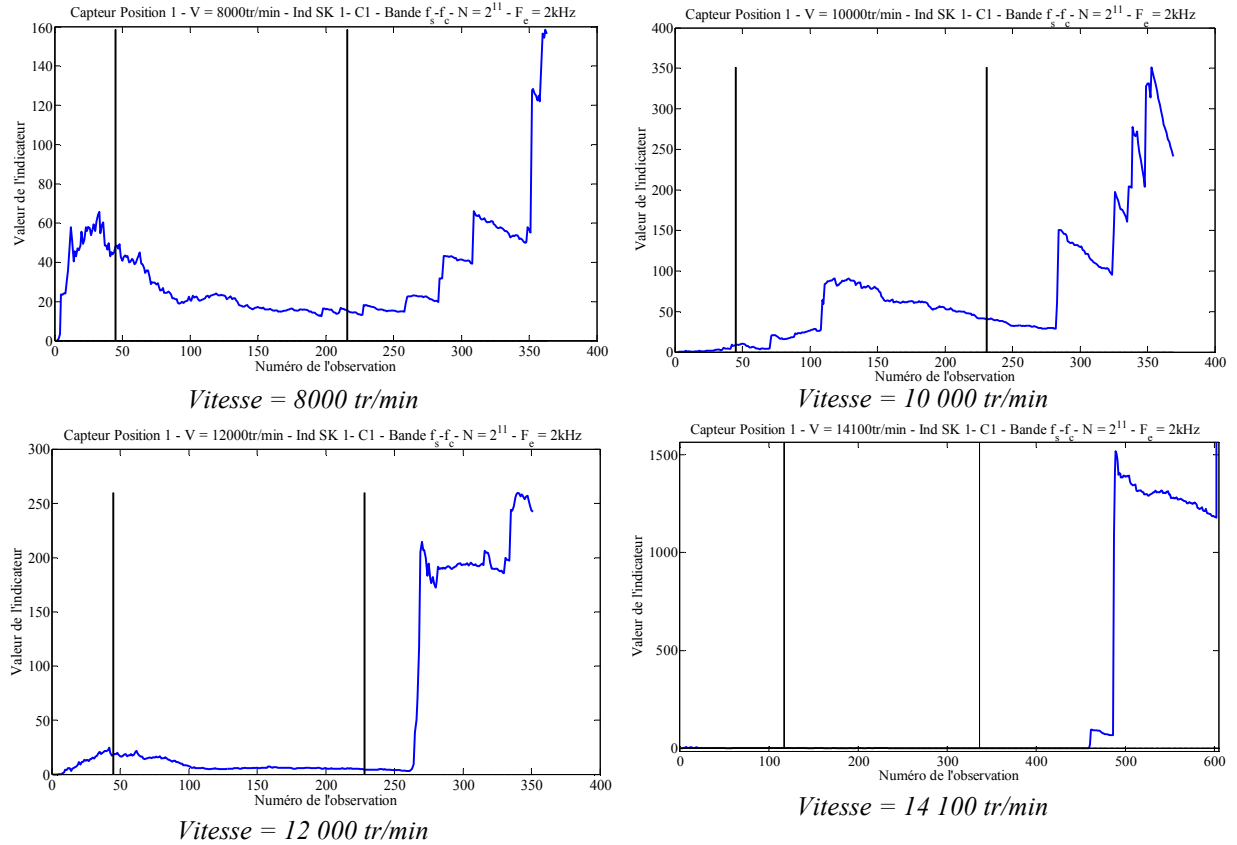


Figure 4-35 : indicateur SKC position à $f_s - f_{cage}$

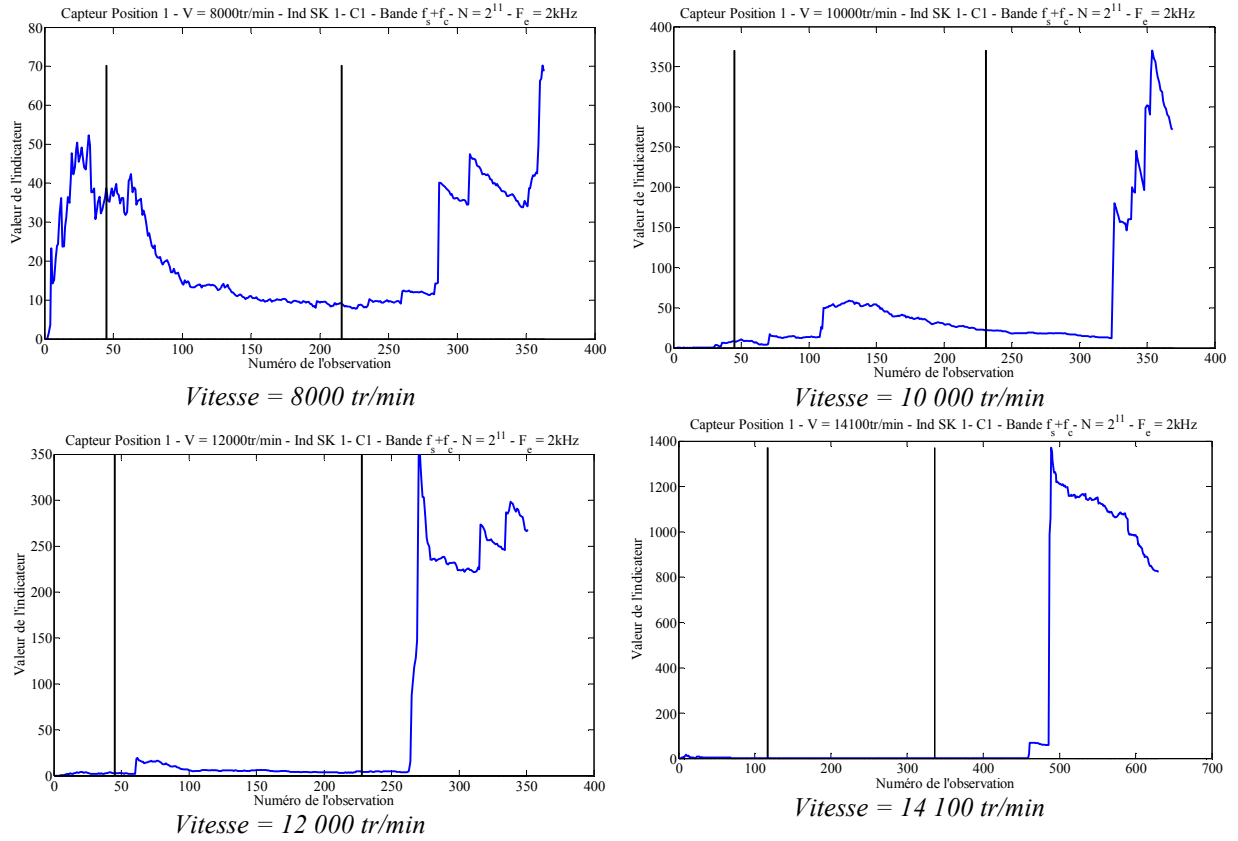


Figure 4-36 : indicateur SKC position à $f_s + f_{cage}$

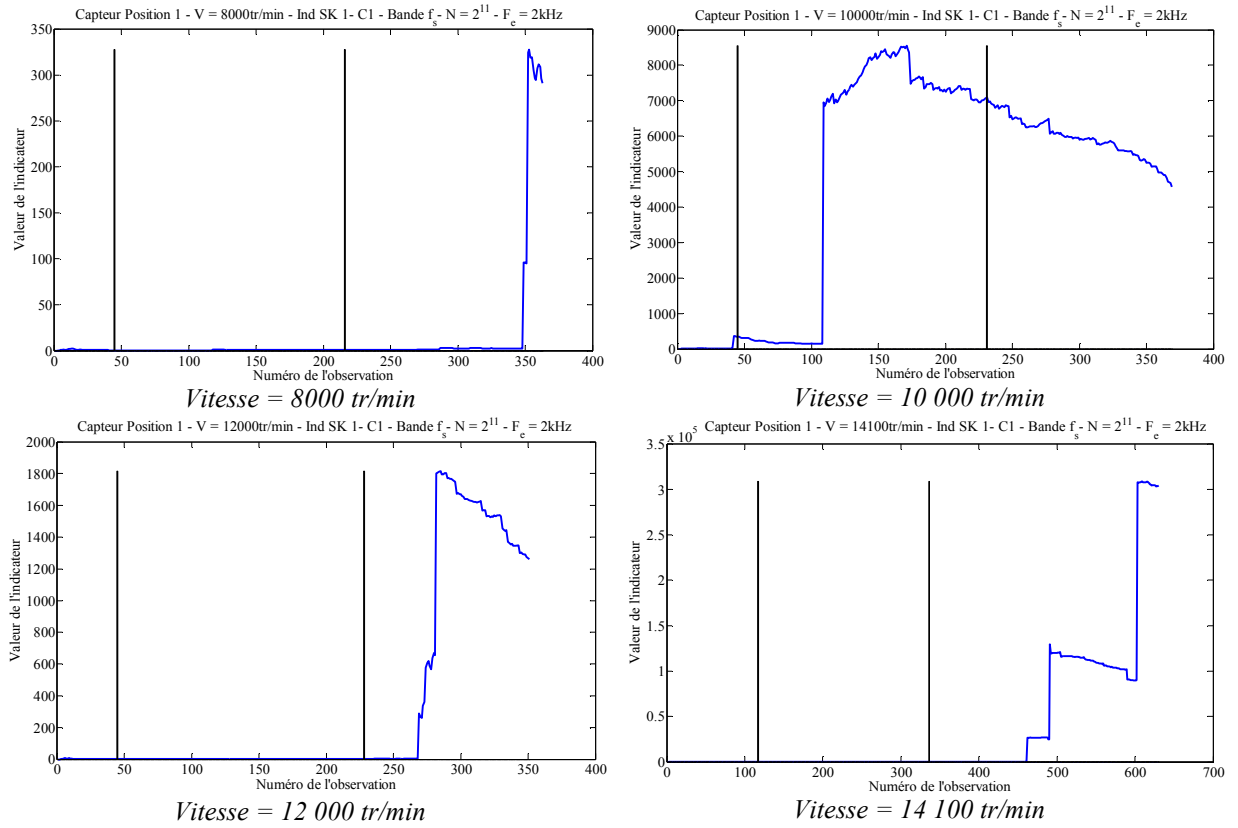


Figure 4-37 : indicateur SKC position à $f_s \pm f_{BF}$

Nous remarquons que tous ces indicateurs offrent une bonne détection de défauts sauf celui à $f_s \pm f_{cage}$ à 8000 tr/min. Nous remarquons encore que l'indicateur à $f_s \pm f_{BF}$ est beaucoup plus contributif que sur les autres fréquences pour les différentes vitesses de fonctionnement.

Nous remarquons également que l'indicateur SK de position réagit avant l'indicateur vibratoire à la vitesse 10 000 tr/min. Ceci est lié probablement à des événements autres que le défaut mécanique surveillé, comme le défaut de flasque ou le défaut électrique. Ce cas sera traité dans le paragraphe 4.11.

4.9.3 Indicateur Kurtosis Spectral de courant statorique

D'après le tableau 4-7, les harmoniques sensibles au défaut et communs pour toutes les vitesses de fonctionnement dans le spectre de courant statorique sont à $(6k \pm 1)f_s \pm f_{BF}$, $(6k \pm 1).f_s \pm f_r \pm f_{BF}$ et $(6k \pm 1).f_s \pm f_{cage}$. Les figures suivantes montrent le SK du signal courant statorique pour $k = 0$ sur les fréquences $f_s \pm f_{BF}$, $f_s \pm f_r \pm f_{BF}$ et $f_s \pm f_{cage}$ pour les différentes vitesses de fonctionnement (figure 4-38 pour la fréquence $f_s + f_r \pm f_{BF}$, figure 4-39 pour la fréquence $f_s - f_r \pm f_{BF}$, figure 4-40 pour la fréquence $f_s + f_{cage}$, figure 4-41 pour la fréquence $f_s - f_{cage}$, et figure 4-42 pour la fréquence $f_s \pm f_{BF}$).

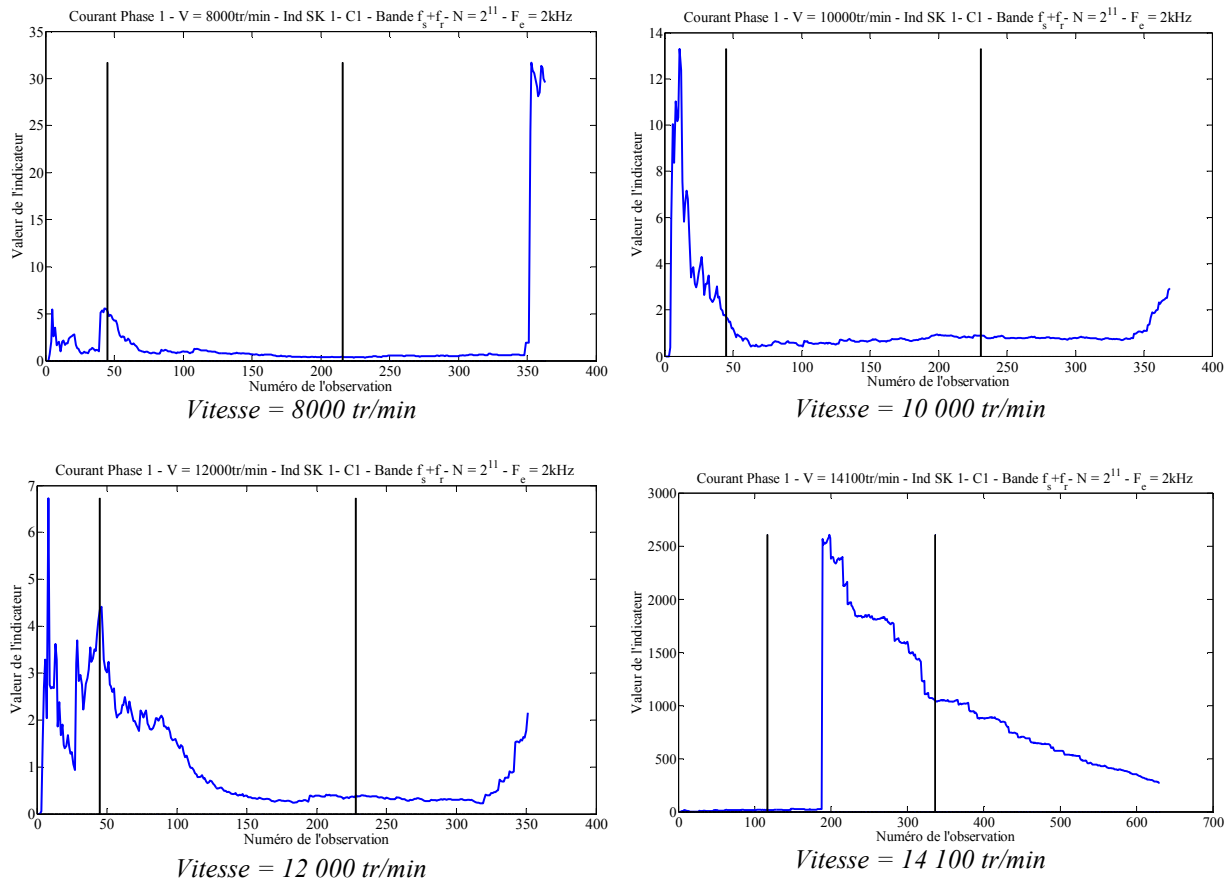


Figure 4-38 : indicateur SKC courant statorique à $f_s + f_r \pm f_{BF}$

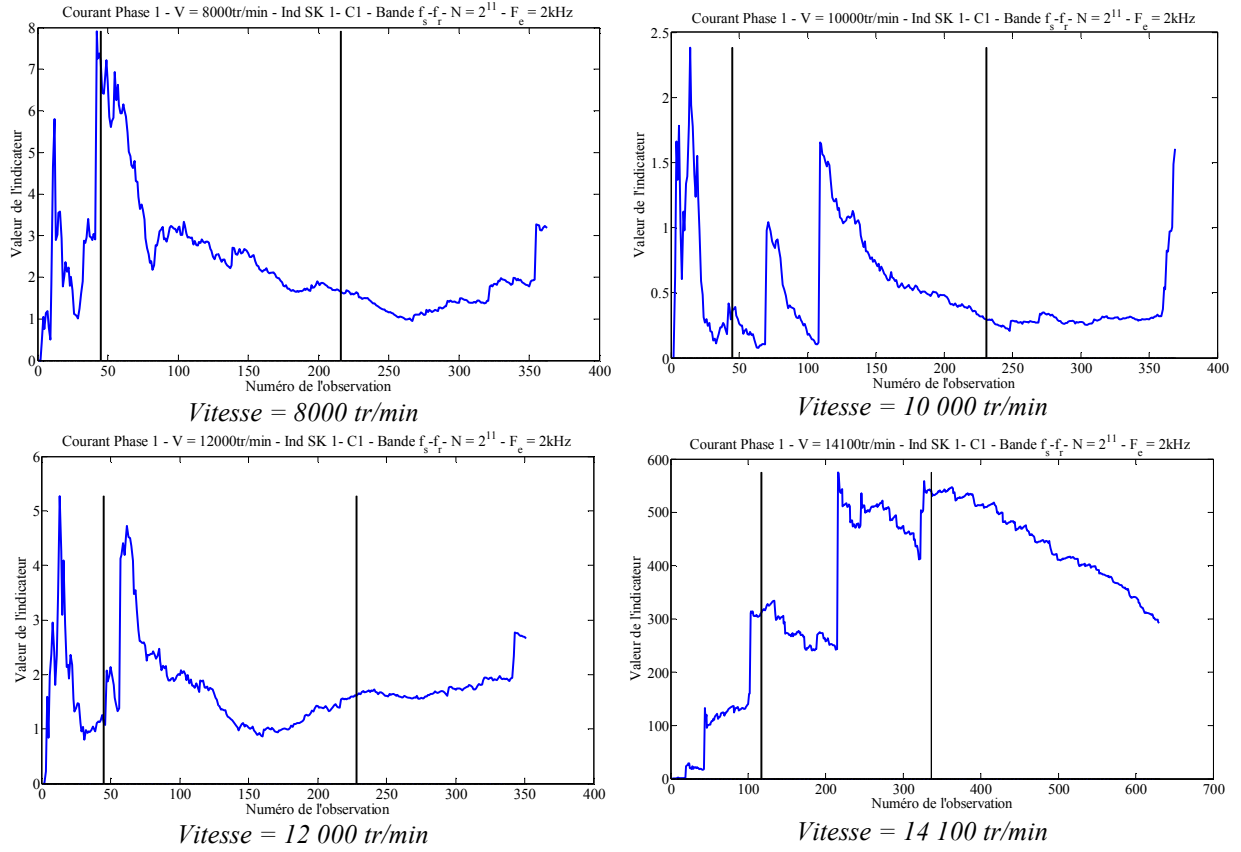


Figure 4-39 : indicateur SKC courant statorique à $f_s - f_r \pm f_{BF}$

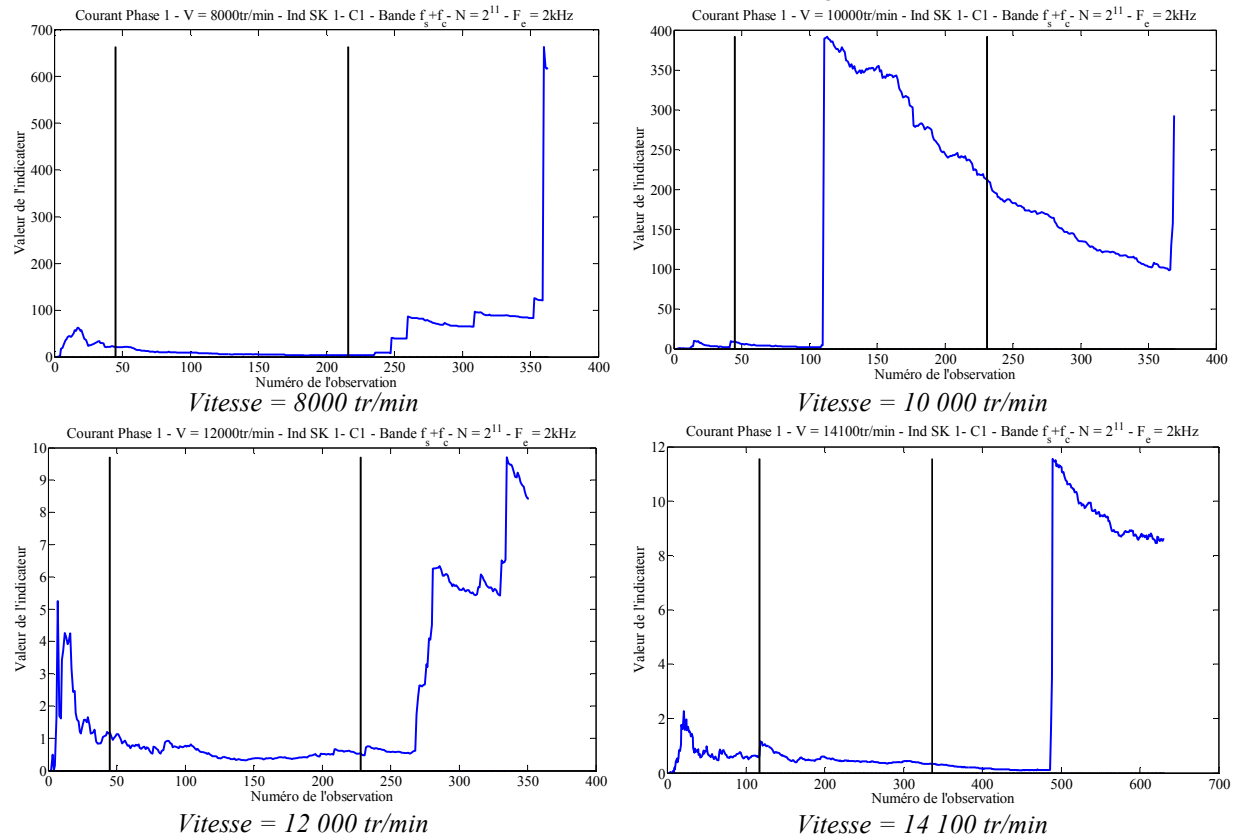


Figure 4-40 : indicateur SKC courant statorique à $f_s + f_c$

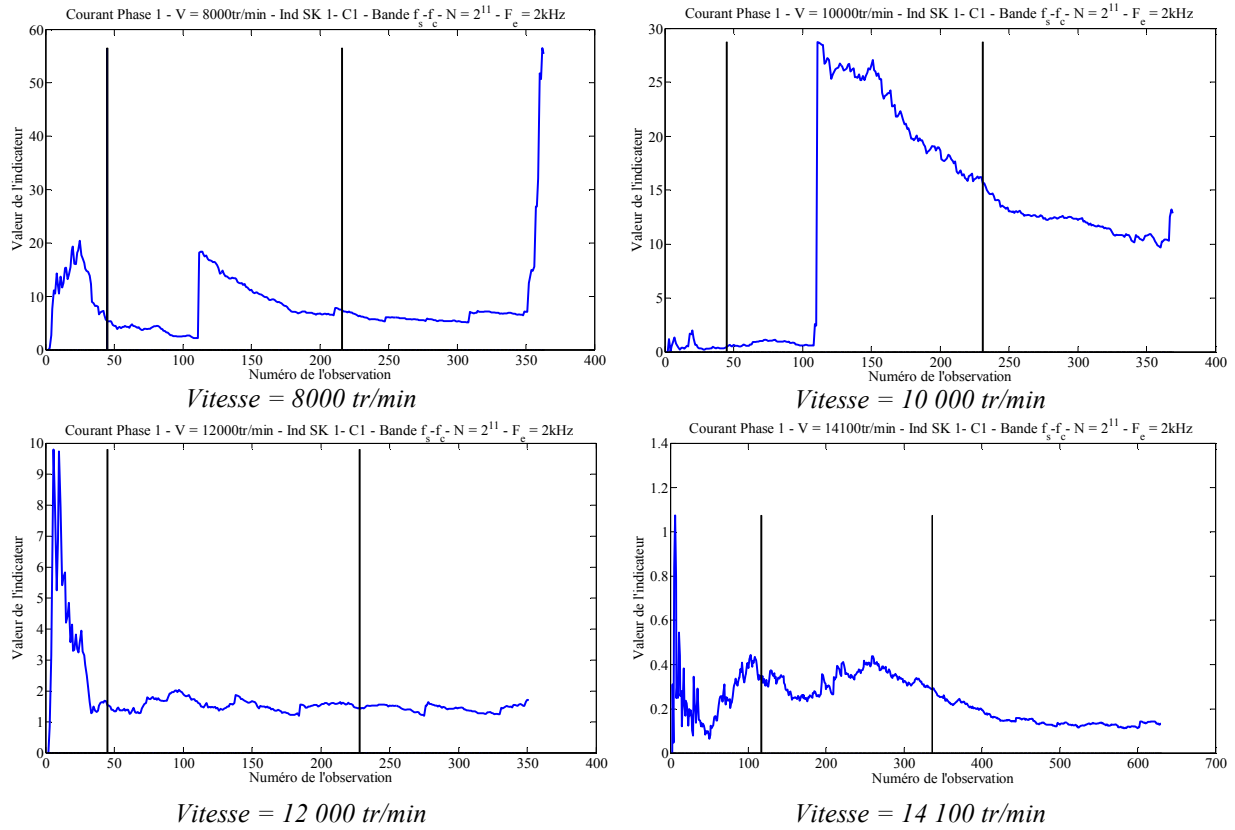


Figure 4-41 : indicateur SKC courant statorique à $f_s - f_c$

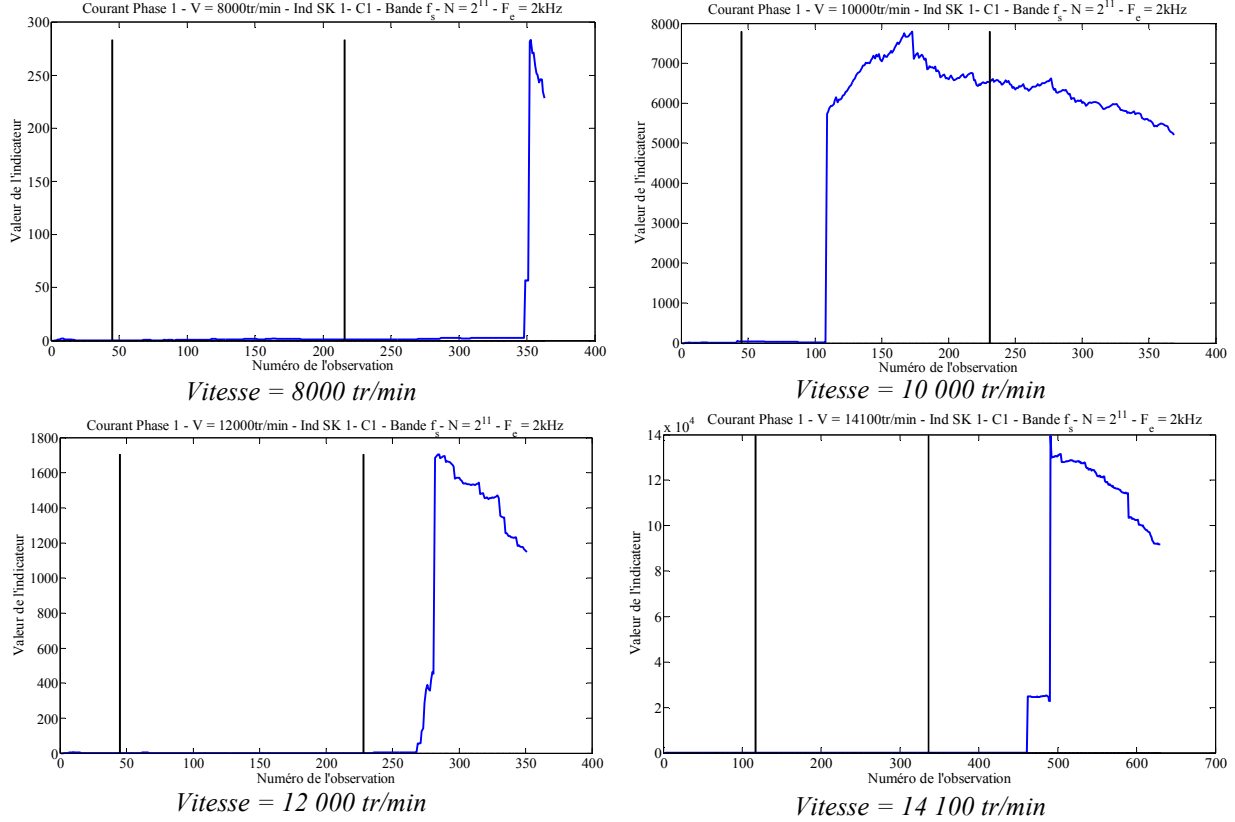


Figure 4-42 : indicateur SKC courant statorique à $f_s \pm f_{BF}$

Nous remarquons que l'indicateur SK de courant offre une bonne détection de défauts pour les fréquences $f_s \pm f_{BF}$ et $f_s + f_{cage}$ pour les différentes vitesses de fonctionnement. Pour les familles $f_s + f_r \pm f_{BF}$ nous remarquons que l'indicateur offre une bonne séparation sain/défaut seulement pour la vitesse 8000 tr/min. Pour les familles $f_s - f_r \pm f_{BF}$ nous remarquons que l'indicateur ne réagit pas à la présence du défaut, quelle que soit la vitesse. Pour ces familles, l'indicateur réagit avant l'indicateur vibratoire à la vitesse 14 100 tr/min. Comme précédemment, ceci est lié probablement à des événements autres que le défaut mécanique surveillé (défaut de flasque ou défaut électrique). Ce cas sera traité dans le paragraphe 4.11. Les valeurs des indicateurs SK à la fréquence $f_s \pm f_{BF}$ sont plus fortes que sur d'autres fréquences sélectionnées. Un indicateur global de SK de courant sur toutes les fréquences sélectionnées ressemblera à celui calculé sur une bande unique. L'indicateur SK de courant statorique semble globalement moins pertinent que celui de position ou de vitesse.

4.9.4 Indicateur Kurtosis Spectral de courant onduleur

D'après le tableau 4-7, les harmoniques sensibles au défaut et commune pour toutes les vitesses de fonctionnement dans le spectre de courant onduleur sont à $2f_s \pm f_{BF}$, $4f_s \pm f_{BF}$ et $6f_s \pm f_{BF}$. Les figures suivantes montrent le SK du signal courant onduleur sur ces fréquences pour les différentes vitesses de fonctionnement (figure 4-43 pour la fréquence $2f_s \pm f_{BF}$, figure 4-44 pour la fréquence $4f_s \pm f_{BF}$, et figure 4-45 pour la fréquence $6f_s \pm f_{BF}$).

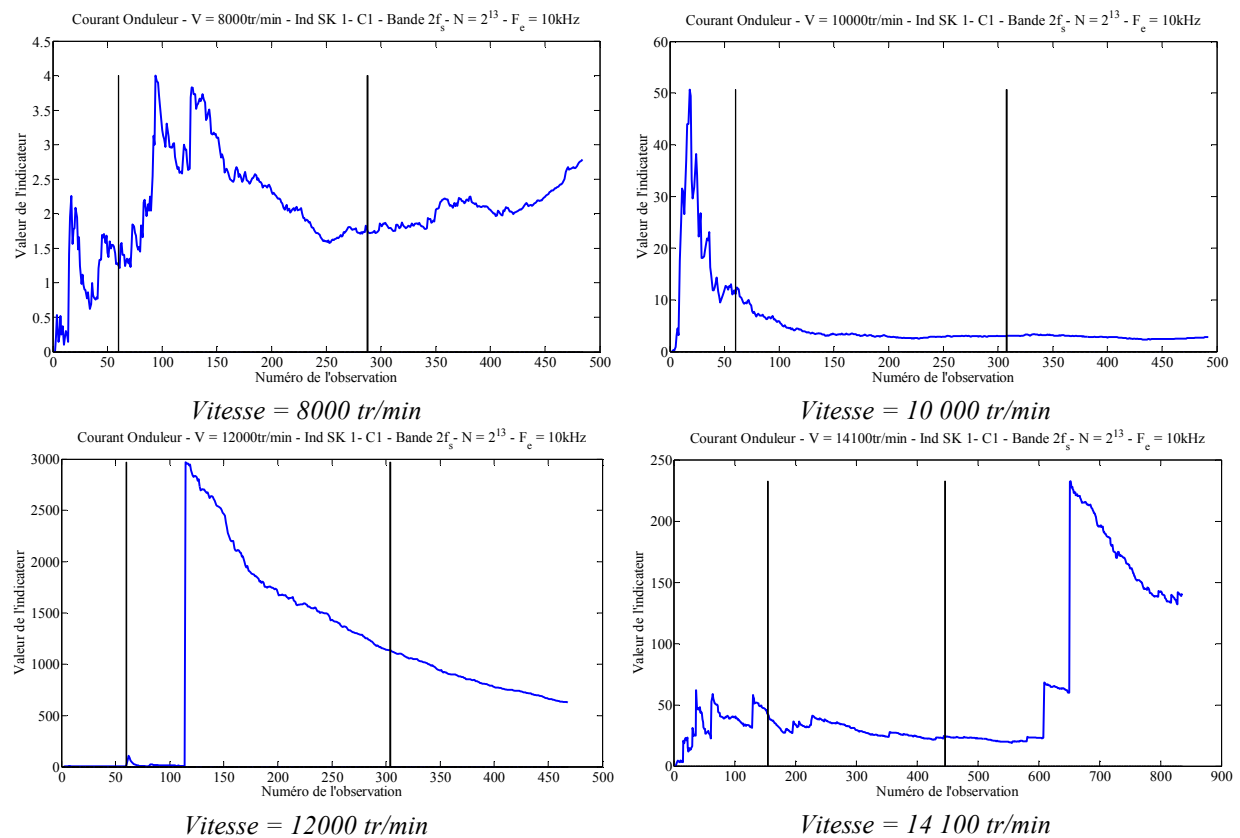
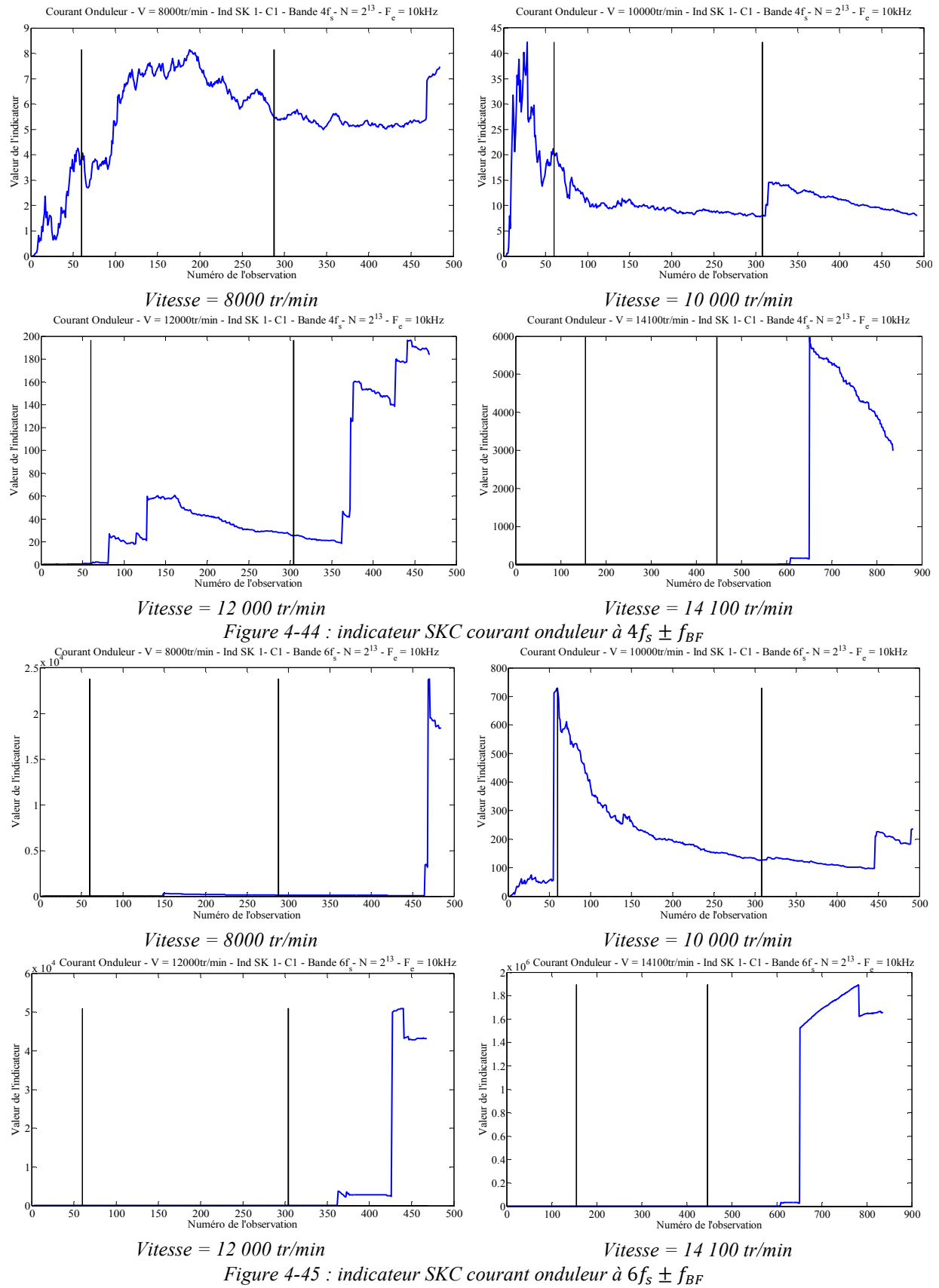


Figure 4-43 : indicateur SKC courant onduleur à $2f_s \pm f_{BF}$

Chapitre 4: Construction d'indicateurs statistiques utilisant le Kurtosis Spectral pour la détection de défauts de roulements



Nous remarquons sur ces figures que l'indicateur SK ciblé sur la fréquence $6f_s \pm f_{BF}$ offre une bonne détection de défaut pour les différentes vitesses de fonctionnement. Par ailleurs, l'indicateur calculé sur la vitesse 14 100 tr/min offre également une bonne détection de défauts pour les différentes fréquences sélectionnées.

Pour les fréquences $2f_s \pm f_{BF}$ et $4f_s \pm f_{BF}$, l'indicateur calculé à la vitesse 12 000 tr/min réagit avant l'indicateur vibratoire. Ceci est encore une fois lié probablement à des événements autres que le défaut mécanique surveillé, comme le défaut de flasque ou un défaut électrique. Ce cas sera traité dans le paragraphe 4.11.

• Remarque :

Les derniers enregistrements faits dans la campagne d'essai N°1 furent réalisés à 14 100 tr/min, juste avant la panne complète du roulement. Sur ces derniers enregistrements, l'indicateur SK de position tend vers des valeurs beaucoup plus élevées comparées aux valeurs de l'indicateur pour les autres enregistrements. Nous montrons ainsi sur la figure 4-46 l'indicateur SK sur les fréquences $f_s - f_{cage}$ et $f_s - f_r$, avec un zoom sur les valeurs des 10 derniers enregistrements. Nous remarquons que l'indicateur augmente de 64 000 fois pour la fréquence $f_s - f_{cage}$, et de 266 000 fois pour la fréquence $f_s - f_r$.

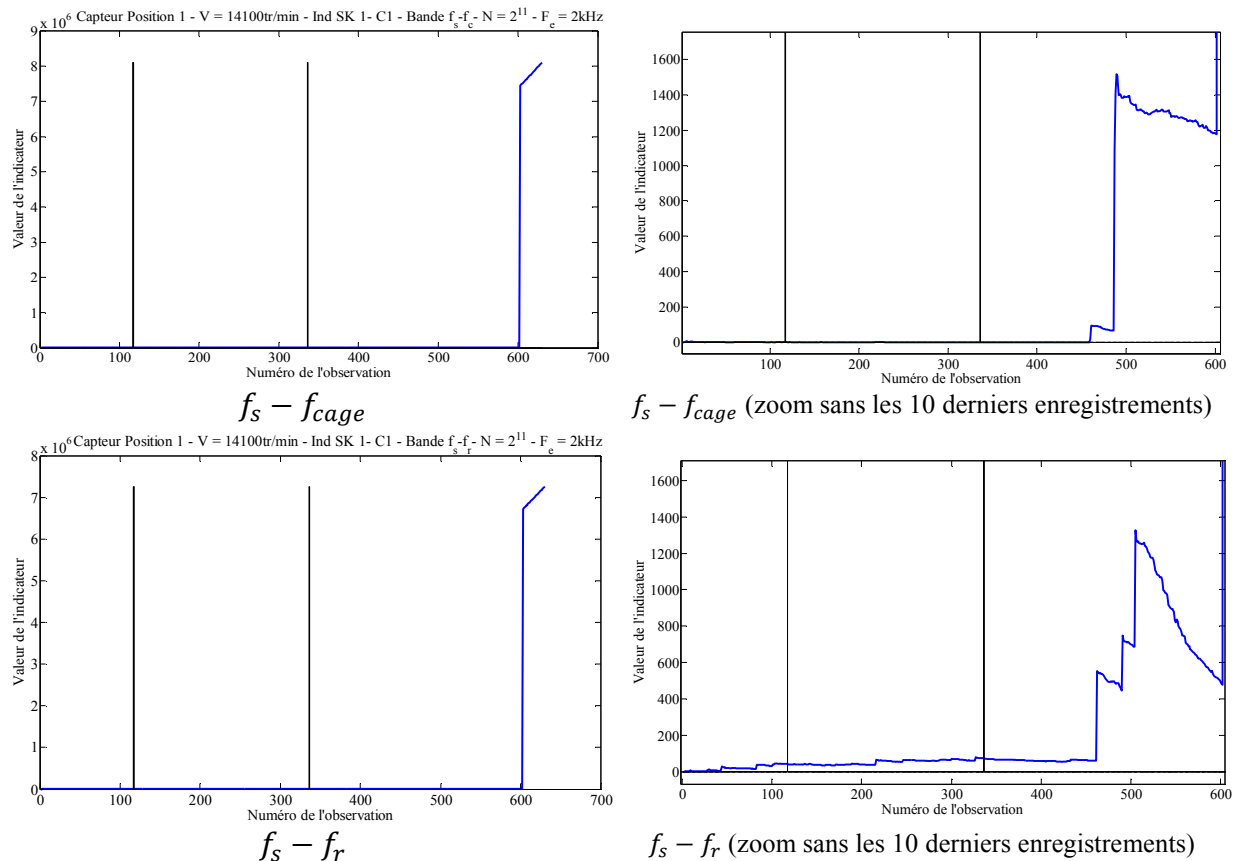


Figure 4-46 : indicateur SKC sur la fin de vie du roulement pour le signal de position

Nous remarquons que l'indicateur réagit bien avant la fin de vie du roulement, en indiquant des niveaux quelques centaines de fois plus grand que le niveau de l'indicateur en sain.

4.10 Application des critères de qualité sur les indicateurs SK

Nous avons expliqué dans le paragraphe 3.5 les différents critères permettant d'évaluer la qualité d'un indicateur. Dans ce paragraphe, nous allons utiliser les mêmes critères sur les indicateurs SK des différents signaux et pour les différentes vitesses de fonctionnement, afin de dégager les cas les plus intéressants, c'est-à-dire les indicateurs fournissant le meilleur diagnostic robuste. Nous commençons par montrer le principe de cette comparaison sur un premier exemple de comparaison entre l'indicateur énergétique et l'indicateur SK [116] sur la figure 4-47 pour le signal vitesse à 14 100 tr/min. Dans ce cas, l'indicateur est calculé autour de la fréquence de cage. Nous montrons dans le tableau 4-8 les résultats chiffrés des critères de comparaison pour les deux indicateurs.

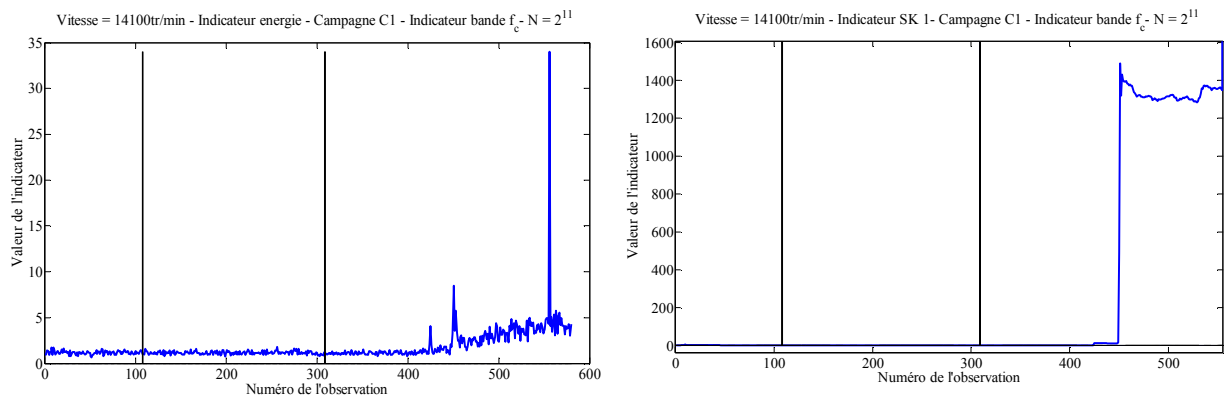


Figure 4-47 : Indicateurs énergétique et SK – vitesse = 14100 tr/mn, $N=2^{11}$, fréquence f_{cage} pour le signal vitesse

	Indicateur énergétique	Indicateur SK
Rapidité	48	58
Ecart S/D	48	100
Fiabilité (Vraie alarme)	32	100
Fiabilité (Fausse alarme)	100	100
Critère global	54,4	88,6

Tableau 4-8 : Critères de comparaison des indicateurs énergétique et SK (signal vitesse, 14100 tr/min, autour de la fréquence f_{cage})

D'après la comparaison des critères des deux indicateurs, nous pouvons conclure que :

- L'indicateur SK réagit avant l'indicateur énergétique,
- L'indicateur SK a un meilleur écart entre les valeurs saines et les valeurs défaillantes par rapport à l'indicateur énergétique,
- L'indicateur SK est plus fiable que l'indicateur énergétique au niveau des vraies alarmes, avec un avantage certain pour le SK,
- Les deux indicateurs ont une bonne fiabilité au niveau des fausses alarmes,
- Le critère global montre une efficacité bien meilleure pour l'indicateur SK par rapport à l'indicateur énergétique.

Dans la suite, nous montrons les critères généralisés pour les différents signaux étudiés.

4.10.1 Critères généralisés des indicateurs SK de vitesse

Nous avons montré, dans le paragraphe 4.4 que l'indicateur SK est efficace pour le signal vitesse quand il est calculé autour des harmoniques f_{cage} et $f_r - 2f_{cage}$ pour la première campagne d'essai. Nous avons également remarqué la présence de certains harmoniques en basse fréquence dans le Kurtosis spectral de vitesse (la zone autour de f_{BF}). Finalement, nous avons relevé pour la deuxième campagne, la présence d'harmoniques dans le spectre de vitesse aux fréquences f_r et $2f_s \pm f_r$, comme le montre par exemple la figure 4-48 à la vitesse 12 000 tr/min. Rappelons que le spectre de vitesse de la deuxième campagne est calculé à partir des trois capteurs de position, la fréquence maximale est donc égale à $3f_s$. Ces harmoniques sont présents dans le spectre de vitesse en régime sain et en défaillant, mais leurs amplitudes sont remarquablement plus importantes en cas défaillant. Nous allons dans la suite inclure la fréquence f_r dans le calcul des critères. Nous n'inclurons pas les fréquences $2f_s \pm f_r$ puisqu'elles dépassent la fréquence maximale de la première campagne (f_s).

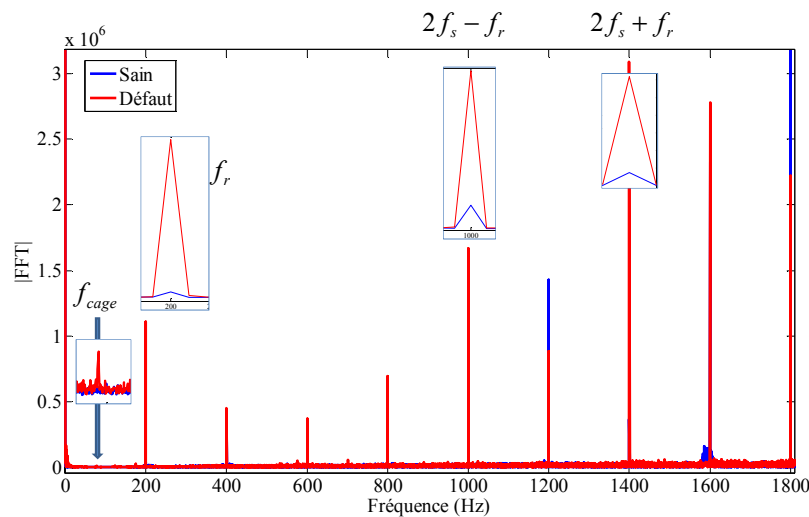


Figure 4-48 : Kurtosis spectral de vitesse à 12 000 tr/min – campagne N°2

Le tableau 4-9 montre les critères généralisés appliqués sur les indicateurs SK de vitesse pour les différentes vitesses de fonctionnement, pour les deux campagnes d'essais, et pour les familles fréquentielles : f_r , f_{cage} , $f_r - 2f_{cage}$ et f_{BF} .

		f_c	f_r	$f_r - 2f_c$	f_{BF}	Moyenne par vitesse
Campagne N°1	8000 tr/min	66	12	43	43	41
	10 000 tr/min	80	17	74	9	45
	12 000 tr/min	89	21	87	9	52
	14 100 tr/min	89	72	74	86	80
Moyennes campagne N°1		81	31	70	37	
Campagne N°2	8000 tr/min	75	76	76	47	69
	10 000 tr/min	47	73	24	12	39
	12 000 tr/min	20	67	59	10	39
	14 100 tr/min	87	70	71	7	69
Moyennes campagne N°2		57	72	58	19	

Tableau 4-9 : Critères généralisés – Signal vitesse – $N = 2^{11}$

Nous remarquons tout d'abord que les valeurs des critères obtenues par l'indicateur SK sont plus importantes comparées à celles obtenues avec l'indicateur énergétique. Pour la campagne N°1, nous remarquons que les meilleures valeurs des critères sont obtenues pour l'indicateur SK ciblé sur la bande de l'harmonique à f_{cage} . Pour la campagne N°2, nous remarquons que les meilleures valeurs des critères sont obtenues pour l'indicateur SK ciblé sur le bande de l'harmonique à f_r (sauf à 14 100 tr/min). Ceci est cohérent avec les conclusions auxquelles nous avons abouti pour les indicateurs énergétiques, à savoir que la dégradation des roulements ne s'est pas opérée de la même manière pour les 2 campagnes.

En termes de valeur moyenne des critères selon la vitesse, nous remarquons que les meilleures valeurs sont obtenues à 14 100 tr/min pour la campagne N°1 et à 8 000 tr/min pour la campagne N°2. Ceci est encore cohérent avec les résultats obtenus sur les indicateurs énergétiques. Nous remarquons également que les critères présentent des valeurs importantes pour toutes les bandes sélectionnés, à 14 100 tr/min pour la campagne N°1 et à 8 000 tr/min pour la campagne N°2. Ceci peut se justifier par les dates des enregistrements des deux campagnes. En effet, les derniers enregistrements avant la mort du roulement dans la première campagne furent réalisés à 14 100 tr/min et dans la deuxième campagne à 8 000 tr/min.

D'après les résultats du tableau 4-9, nous construisons le tableau 4-10 qui étudie la pertinence de l'indicateur SK de vitesse pour les deux campagnes d'essais et pour les différentes fréquences étudiées en fixant la taille d'observation à 2^{11} . Nous considérons ici que l'indicateur est pertinent à partir des valeurs de critères supérieures à 50%.

	f_r	f_{cage}	$f_r - 2f_{cage}$	f_{BF}
8000 tr/min	C2	C1 et C2	C2	x
10 000 tr/min	C2	C1	C1	x
12 000 tr/min	C2	C1	C1 et C2	x
14 100 tr/min	C1 et C2	C1 et C2	C1 et C2	C1

Tableau 4-10 : Pertinence des différentes familles d'harmoniques sélectionnés, pour l'indicateur SK de vitesse, et pour les différentes vitesses de fonctionnement ; C1 = campagne d'essais n°1 et C2 = campagne d'essais n°2

D'après ce tableau, quand une case est remplie par C1 par exemple, (vitesse = 10 000 tr/min, fréquence f_{cage}), cela signifie que le critère généralisé calculé pour la vitesse correspondante et pour la fréquence sélectionnée dépasse les 50% dans la campagne N°1. En conclusion de ce tableau, le meilleur indicateur (par rapport aux valeurs des critères) calculé par la méthode SK sur le signal vitesse est celui ciblé sur les fréquences f_{cage} et $f_r - 2f_{cage}$.

4.10.2 Critères généralisés des indicateurs SK de position

		$f_s + f_c$	$f_s - f_c$	$f_s + f_r \pm f_{BF}$	$f_s - f_r \pm f_{BF}$	$f_s \pm f_{BF}$	$f_s + (f_r - 2f_c)$	$f_s - (f_r - 2f_c)$	Moyenne par vitesse
Campagne N°1	8000 tr/min	23	41	71	77	79	26	16	48
	10 000 tr/min	72	74	82	57	71	68	74	71
	12 000 tr/min	87	92	90	88	91	75	60	83
	14 100 tr/min	89	89	82	85	80	14	72	73
Moyennes campagne N°1		68	74	81	77	80	46	55	
Campagne N°2	8000 tr/min	72	73	74	75	72	59	70	71
	10 000 tr/min	83	62	72	72	81	90	79	77
	12 000 tr/min	74	46	62	62	82	23	15	52
	14 100 tr/min	77	76	90	92	60	77	77	78
Moyennes campagne N°2		77	64	75	75	74	62	60	

Tableau 4-11 : Critères généralisés – Signal position – $N = 2^{11}$

Nous avons montré, dans le paragraphe 2.6.1 que l'apparition d'un harmonique f_{osc} dans le spectre de vitesse entraîne l'apparition d'harmonique aux fréquences $(2k + 1) \cdot f_s \pm f_{osc}$ dans le spectre de position. Puisque les harmoniques présents dans le SK de vitesse et synonymes de la présence d'un défaut sont f_{BF}, f_{cage}, f_r et $f_r - 2f_{cage}$, nous allons donc calculer les critères généralisés des indicateurs SK de position sur les fréquences $f_s \pm f_{BF}, f_s \pm f_{cage}, f_s \pm f_r$ et $f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$. Le tableau 4-11 montre l'évaluation des critères généralisés de l'indicateur SK de position pour les différentes vitesses de fonctionnement.

Généralement, nous remarquons que les valeurs des critères supérieures à 50% pour les différentes vitesses de fonctionnement et pour les différentes bandes fréquentielles sélectionnées sont nombreuses. Néanmoins, nous montrons dans le tableau 4-11 à l'aide de zones grisées, les cas où les critères ne dépassent pas 50%. Il s'agit des bandes $f_s \pm f_{cage}$ et $f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ à 8 000 tr/min et $f_s + f_r - 2f_{cage}$ à 14100 tr/min pour la campagne N°1 et $f_s - f_{cage}$ $f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$ à 12 000 tr/min pour la campagne N°2. Ces résultats sont cohérents si l'on se réfère à l'horodatage des enregistrements. En effet, les derniers enregistrements réalisés à 8 000 tr/min pour la campagne N°1 datent de 1 jour avant la mort du roulement, ceux à 12 000 tr/min pour la campagne N°2 datent de deux jours avant la mort du roulement. Ces enregistrements sont temporellement trop loin de la zone de fin de vie et de dégradation franche du roulement et la réaction des indicateurs est par conséquent plus faible que dans les autres cas.

Ce tableau, nous permet de construire le tableau 4-12 qui étudie la pertinence de l'indicateur SK sur le signal de position pour les deux campagnes d'essais et pour les différentes fréquences étudiées en fixant la taille d'observation à 2^{11} . D'après ce tableau, le meilleur indicateur calculé par la méthode SK sur le signal position est celui ciblé sur les fréquences $f_s \pm f_r$ et $f_s \pm f_{BF}$.

	$f_s \pm f_{BF}$	$f_s - f_{cage}$	$f_s + f_{cage}$	$f_s - f_r \pm f_{BF}$	$f_s + f_r \pm f_{BF}$	$f_s - f_r + 2f_{cage}$	$f_s + f_r - 2f_{cage}$
8000 tr/min	C1 et C2	C2	C2	C1 et C2	C1 et C2	C2	C2
10000 tr/min	C1 et C2	C1 et C2	C1 et C2	C1 et C2	C1 et C2	C1 et C2	C1 et C2
12000 tr/min	C1 et C2	C1	C1 et C2	C1 et C2	C1 et C2	C1	C1
14100 tr/min	C1 et C2	C1 et C2	C1 et C2	C1 et C2	C1 et C2	C1 et C2	C2

Tableau 4-12 : Pertinence de l'indicateur SK de position pour les différentes vitesses de fonctionnement sur les différentes familles d'harmoniques sélectionnés

4.10.3 Critères généralisés des indicateurs SK de courant statorique

Nous avons montré dans le paragraphe 2.6.2 que l'apparition d'un harmonique f_{osc} dans le spectre de vitesse entraîne l'apparition des harmoniques à $(6k \pm 1) \cdot f_s \pm f_{osc}$ dans le spectre de courant statorique. Puisque les harmoniques présents dans le SK de vitesse et synonyme de la présence d'un défaut sont f_{BF} , f_{cage} , f_r et $f_r - 2f_{cage}$, nous allons donc calculer les critères généralisés des indicateurs SK de courant statorique sur les fréquences f_s , $f_s \pm f_{cage}$, $f_s \pm f_r$ et $f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$. Le tableau 4-13 montre l'évaluation de ces critères généralisés de l'indicateur SK de courant statorique pour les différentes vitesses de fonctionnement.

		$f_s + f_c$	$f_s - f_c$	$f_s + f_r \pm f_{BF}$	$f_s - f_r \pm f_{BF}$	$f_s \pm f_{BF}$	$f_s + (f_r - 2f_c)$	$f_s - (f_r - 2f_c)$	Moyenne par vitesse
Campagne N°1	8000 tr/min	67	49	71	17	87	74	24	56
	10 000 tr/min	82	82	13	23	78	17	16	44
	12 000 tr/min	68	11	15	20	91	7	10	32
	14 100 tr/min	86	11	82	68	80	42	45	59
Moyennes campagne N°1		76	38	45	32	84	35	24	
Campagne N°2	8000 tr/min	72	81	75	76	72	72	71	74
	10 000 tr/min	73	61	72	73	81	80	91	76
	12 000 tr/min	12	20	11	18	88	9	9	24
	14 100 tr/min	59	23	86	80	71	7	11	48
Moyennes campagne N°2		54	46	61	62	78	42	46	

Tableau 4-13 : Critère généralisé – Signal courant statorique – $N = 2^{11}$

En termes de valeur moyenne des critères par bande, nous remarquons que les meilleures valeurs des critères sont obtenues pour les indicateurs ciblés sur les bandes à $f_s + f_c$ et $f_s \pm f_{BF}$ pour la campagne N°1, et à $f_s + f_c$, $f_s \pm f_{BF}$ et $f_s \pm f_r$ pour la campagne N°2.

D'après ces figures, nous allons construire le tableau 4-14 qui étudie la pertinence de l'indicateur SK de courant statorique pour les deux campagnes d'essais et pour les différentes fréquences étudiées en fixant la taille d'observation à 2^{11} .

	$f_s \pm f_{BF}$	$f_s - f_{cage}$	$f_s + f_{cage}$	$f_s - f_r \pm f_{BF}$	$f_s + f_r \pm f_{BF}$	$f_s - f_r + 2f_{cage}$	$f_s + f_r - 2f_{cage}$
8000 tr/min	C1 et C2	C2	C1 et C2	C2	C1 et C2	C2	C1 et C2
10000 tr/min	C1 et C2	C1 et C2	C1 et C2	C2	C2	C2	C2
12000 tr/min	C1 et C2		C1				
14100 tr/min	C1 et C2		C1 et C2	C1 et C2	C1 et C2		

Tableau 4-14 : Pertinence de l'indicateur SK de courant statorique pour les différentes vitesses de fonctionnement sur les différentes familles d'harmoniques sélectionnés

D'après ce tableau, le meilleur indicateur calculé par la méthode SK sur le signal courant statorique est celui ciblé sur la fréquence $f_s \pm f_{BF}$.

4.10.4 Critères généralisés des indicateurs SK de courant onduleur

Nous avons montré dans le paragraphe 2.6.3 que l'apparition d'un harmonique dans le spectre de vitesse entraîne l'apparition de la modulation de cet harmonique à six fois la fréquence statorique (ou plus généralement à $6kf_s$) dans le spectre du courant onduleur. Nous avons déjà remarqué dans le paragraphe 4.7 que l'indicateur SK ne réagit pas dans le signal du courant onduleur aux fréquences $f_s \pm (f_r - 2f_{cage})$. Nous avons également remarqué dans le paragraphe 4.7 que l'indicateur SK réagit sur les fréquences $2f_s$ et $4f_s$. Nous allons donc dans ce paragraphe calculer les critères généralisés des indicateurs SK de position sur les fréquences $2f_s, 4f_s, 6f_s, 6f_s \pm f_{cage}$ et $6f_s \pm f_r$. Le tableau 4-15 montre l'évaluation des critères généralisés de l'indicateur SK du courant statorique pour les différentes vitesses de fonctionnement. Rappelons que pour l'indicateur SK de courant onduleur, la fréquence d'échantillonnage est de 10 kHz et la taille d'observation est de $N = 2^{13}$ points.

En terme de valeur moyenne des critères par bande, nous remarquons que les meilleures valeurs des critères sont obtenues pour les indicateurs ciblés sur les bandes à $6f_s + f_c$ et $6f_s \pm f_{BF}$ pour la campagne N°1, et à $6f_s \pm f_c, 6f_s \pm f_{BF}, 6f_s \pm f_r$ et $4f_s \pm f_{BF}$ pour la campagne N°2.

4.10 Application des critères de qualité sur les indicateurs SK

		$6f_s + f_r$ $\pm f_{BF}$	$6f_s - f_r$ $\pm f_{BF}$	$6f_s + f_c$	$6f_s - f_c$	$6f_s$ $\pm f_{BF}$	$2f_s$ $\pm f_{BF}$	$4f_s$ $\pm f_{BF}$	Moyenne par vitesse
Campagne N°1	8000 tr/min	55	39	85	68	83	24	39	56
	10 000 tr/min	44	10	82	71	21	5	10	35
	12 000 tr/min	10	13	37	17	74	71	71	42
	14 100 tr/min	75	11	13	9	75	69	76	47
Moyennes campagne N°1		46	18	54	41	63	42	49	
Campagne N°2	8000 tr/min	76	76	72	18	83	80	12	60
	10 000 tr/min	63	72	74	99	70	17	84	68
	12 000 tr/min	82	25	56	65	75	10	58	53
	14 100 tr/min	59	27	19	100	74	74	75	61
Moyennes campagne N°2		70	50	55	71	76	45	57	

Tableau 4-15 : Critères généralisés – Signal courant onduleur – $N = 2^{13}$

D'après ces figures, nous allons construire le tableau 4-16 qui étudie la pertinence de l'indicateur SK de courant onduleur pour les deux campagnes d'essai et pour les différentes fréquences étudiées pour une taille d'observation de 2^{13} points.

	$6f_s \pm f_{BF}$	$6f_s - f_{cage}$	$6f_s + f_{cage}$	$6f_s - f_r \pm f_{BF}$	$6f_s + f_r \pm f_{BF}$	$2f_s \pm f_{BF}$	$4f_s \pm f_{BF}$
8000 tr/min	C1 et C2	C1	C1 et C2	C2	C1 et C2	C2	
10 000 tr/min	C2	C1 et C2	C1 et C2	C2	C2		C2
12 000 tr/min	C1 et C2	C2	C2		C2	C1	C1 et C2
14 100 tr/min	C1 et C2	C2			C1 et C2	C1 et C2	C1 et C2

Tableau 4-16 : Pertinence de l'indicateur SK de courant onduleur pour les différentes vitesses de fonctionnement sur les différentes familles d'harmoniques sélectionnés

D'après ce tableau, le meilleur indicateur calculé par la méthode SK sur le signal courant onduleur est celui ciblé sur la fréquence $6f_s$.

- **Remarque**

Nous avons constaté dans le tableau 4-15 que la valeur du critère global atteint ses valeurs maximales pour l'harmonique $6f_s - f_{cage}$ à 10 000 tr/min (99%) et 14 100 tr/min (100%) dans la deuxième campagne d'essais. Ces deux cas présentent une importance particulière puisqu'une valeur du critère global de 100% signifie que les quatre critères de comparaison sont à 100%. Nous montrons sur la figure 4-49 les indicateurs évoqués.

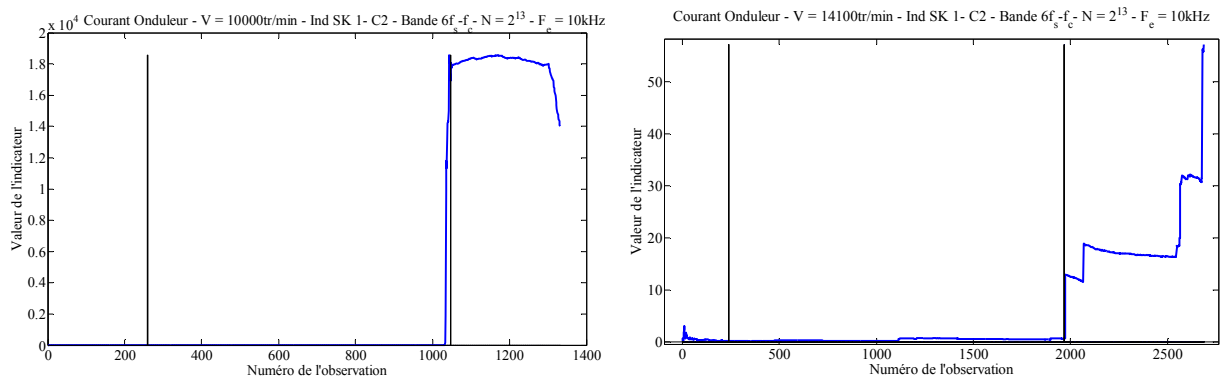


Figure 4-49 : Indicateur SK du courant onduteur correspondant aux cas où le critère global atteint 100%

- **Conclusion partielle sur les indicateurs construits à partir du SK**

D'après les résultats obtenus dans le paragraphe 4.10, le tableau 4-17 résume les fréquences choisies pour la construction d'un indicateur efficace pour chaque signal étudié.

Signal étudié	Fréquences les plus sensibles aux défauts
Vitesse	f_{cage} et $f_r - 2f_{cage}$
Position	$f_s \pm f_{BF}$ et $f_s \pm f_r \pm f_{BF}$
Courant statorique	$f_s \pm f_{BF}$
Courant onduteur	$6f_s \pm f_{BF}$

Tableau 4-17 : Récapitulatifs des fréquences considérés les plus sensibles au défaut pour les différents signaux étudiés

Nous remarquons que la fréquence la plus sensible au défaut dans le SK de vitesse est la fréquence f_{cage} , résultat attendu puisque nous avons cassés la cage en deux points pour accélérer la défaillance de la machine. Pour les signaux position, courant statorique et courant onduteur, nous remarquons que les fréquences les plus sensibles au défaut sont centrées à l'harmonique fondamental de chaque signal, (f_s pour les signaux position et courant statorique et $6f_s$ pour le courant onduteur. Nous expliquons la sensibilité de ces fréquences par l'apparition d'une modulation basse fréquence dans ces signaux, due aux changements du comportement mécanique de la machine, causé par la présence de défaut.

4.11 Kurtosis spectral avec remise à référence

Nous avons montré, dans le paragraphe 4.9, les résultats obtenus sur les différents signaux étudiés avec des indicateurs utilisant le SK. Nous remarquons, pour certains enregistrements de la campagne 1 (voir figure 4-50), que l'indicateur SK réagit avant l'indicateur vibratoire. Rappelons que la réaction de l'indicateur évoquée est à relier au problème de flasque déjà signalé au paragraphe 3.8. Même si nous considérons que ce problème de flasque peut être intéressant à détecter, nous le classons dans une catégorie d'événements exceptionnels qui ne rentre pas en compte dans les objectifs de notre cahier des charges sur la détection de l'usure progressive des roulements. Il implique cependant, selon les critères que nous avons mis en place, une mauvaise détection risquant d'engendrer une fausse alarme.

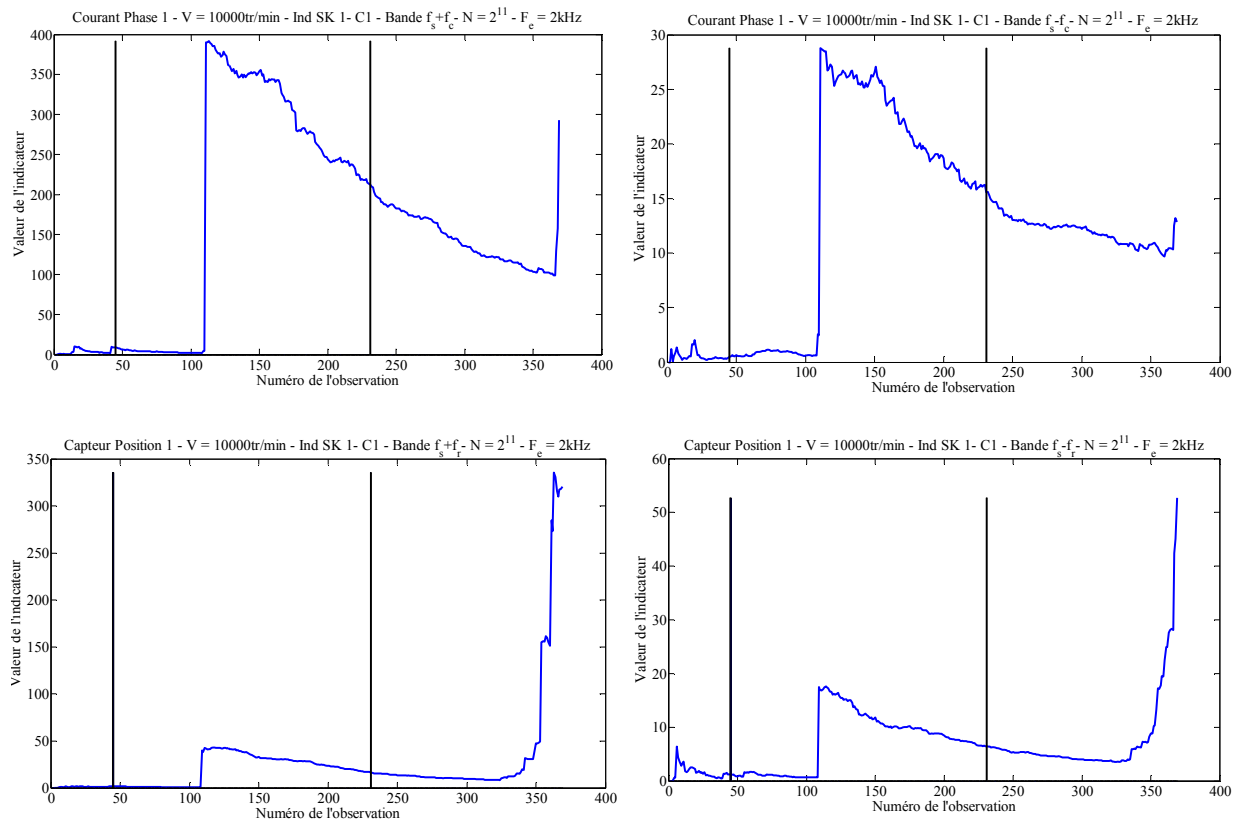


Figure 4-50 : Exemples où l'indicateur SK réagit avant l'indicateur vibratoire

Cet événement permet de mettre en avant un inconvénient de l'indicateur basé sur le SK cumulé. Selon les fréquences considérées, ce dernier va réagir à l'évolution du contenu fréquentiel des signaux, que l'origine de la variation soit un défaut ou une perturbation, ce qui n'est pas toujours un avantage suivant les événements que l'on souhaite détecter. En effet, étant données les propriétés du Kurtosis Spectral cumulé, si un phénomène exogène au défaut de roulements apparaît et engendre la présence d'harmoniques transitoires, l'indicateur risque de réagir en leur présence. Comme le montre la figure 4-50, il va garder la mémoire de cet événement et rester à un niveau élevé même après sa disparition. Si le phénomène ayant fait

réagir l'indicateur est une perturbation ne faisant pas partie des défauts à surveiller, il est souhaitable que l'indicateur y soit le moins sensible possible. Il serait donc intéressant de disposer d'un indicateur ne gardant pas la mémoire totale des phénomènes passés pour permettre « d'oublier » un phénomène transitoire indésirable. Cet indicateur doit néanmoins rester performant pour diagnostiquer les défauts de roulements.

En générale, il peut exister au cours de la durée de vie de l'équipement, de nombreuses sources de variations du spectre des signaux. Une variation inattendue de la tension de bus par exemple, causée par la mise en marche ou l'arrêt d'une autre machine sur le réseau, peut engendrer des événements non périodiques sur les grandeurs, la panne d'un équipement... Les indicateurs SK, et particulièrement les indicateurs globaux, peuvent malheureusement s'avérer sensibles à ces problèmes. D'autres types de défauts comme les défauts de natures électriques, ou mécaniques différentes (enroulement de stator ou défaut d'excentricité) des phénomènes d'usure des roulements peuvent également intervenir en ce sens.

Pour construire un indicateur plus robuste, nous proposons donc une variante de l'indicateur SK cumulé. L'idée exposée ici est toujours de calculer le SK cumulé, mais au lieu de cumuler tous les spectres depuis les premières observations, le cumul est réalisé entre un ensemble de N spectres sains (appelés référence) et de M spectres correspondant aux enregistrements les plus récents réalisées sur l'équipement. Le Kurtosis spectral est évalué sur les $N + M$ spectres et un indicateur, par bande ou global, en est extrait. La statistique est ensuite remise à zéro. On attend alors d'avoir cumulé M nouveau spectres pour évaluer à nouveau le SK avec les mêmes N spectres sains de référence [115]. La figure 4-51 illustre ce principe.

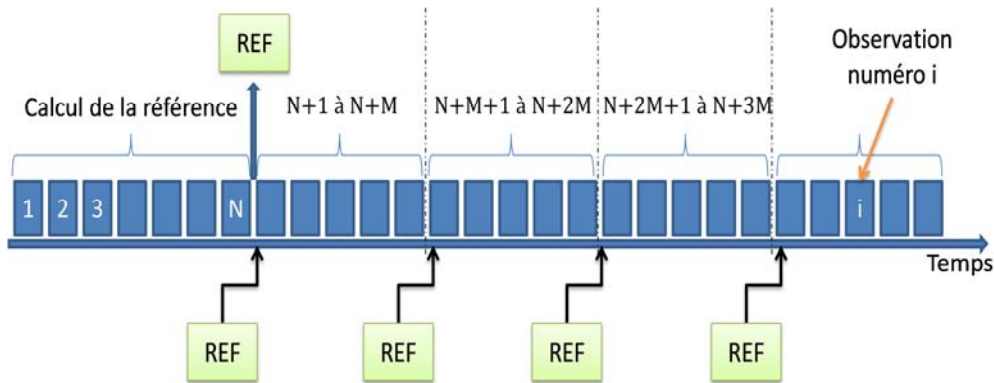


Figure 4-51 : Calcul de l'indicateur SKREF

Ainsi la valeur de SK_{REF} pour l'observation k est obtenue à partir du cumul des observations (4-20):

$$SK_{REF} = SK\{\text{observation } N^\circ: 1 \rightarrow k\} \text{ pour } k < N$$

$$SK_{REF} = SK\left\{\text{observation } N^\circ: 1 \rightarrow N \text{ et } \text{floor}\left(\frac{k - N}{M}\right) \times M + N + 1\right\} \text{ pour } k > N$$
(4-20)

où floor est une fonction qui arrondi un nombre x réel vers le plus proche nombre entier inférieur ou égal à x .

Nous montrons sur les figures suivantes l'indicateur SK_{REF} correspondant aux résultats de la figure 4-50 où l'indicateur SK réagissait avant l'indicateur vibratoire (figure 4-52 pour le signal courant statorique et figure 4-53 pour le signal position).

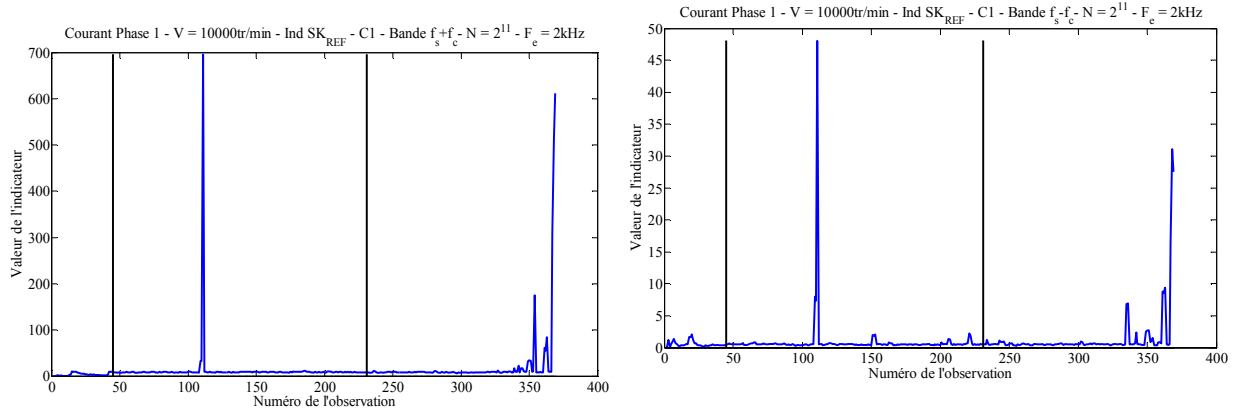


Figure 4-52 : indicateur SKREF- signal courant statorique à $f_s \pm f_{cage}$

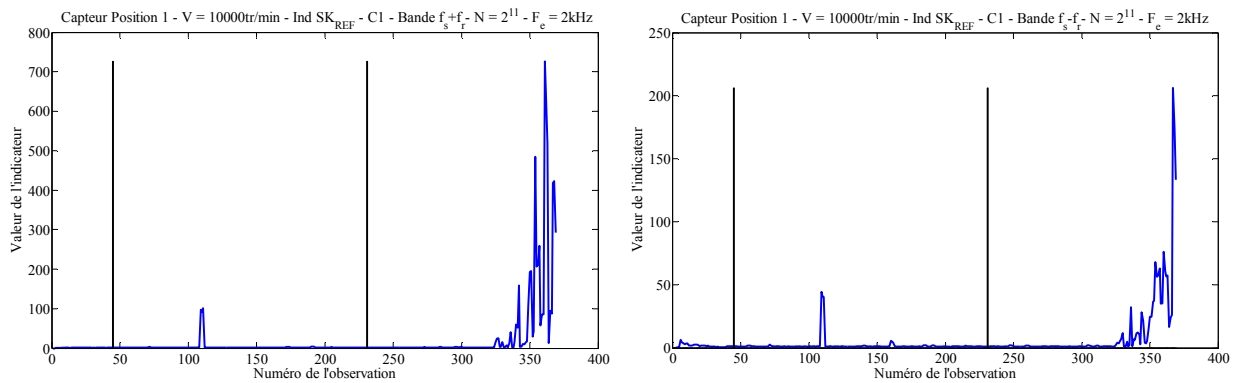


Figure 4-53 : indicateur SKREF – signal position à $f_s + f_r$

Nous remarquons sur ces figures que l'indicateur SKREF réagit toujours avant la zone associée à l'indicateur vibratoire suite au défaut de flasque et circlip pour l'observation $N=112$. Cependant, le mécanisme de référence utilisé entraîne un retour de l'indicateur SK_{REF} à une valeur saine une fois l'événement passé. L'indicateur reste alors à de valeurs proches de la valeur en régime sain jusqu'à l'arrivée dans la zone où le défaut de roulement doit effectivement être détecté. Nous observons alors que l'indicateur réagit très différemment. La fréquence d'apparition des pics que l'on observe montre bien la présence d'un phénomène redondant qui peut clairement être différencié du phénomène liée au flasque. On peut imaginer à partir de cet indicateur un processus permettant de déterminer la fréquence d'apparition des pics pour affirmer ou infirmer la présence d'un phénomène transitoire que l'on ne souhaite pas prendre en compte dans la décision.

4.12 Conclusion

Nous avons dans ce chapitre introduit un outil d'analyse performant, le Kurtosis spectral. Il possède l'intéressante propriété de faire ressortir dans le spectre d'une grandeur, les composantes fréquentielles dont l'apparition se manifeste de manière aléatoire. Avec cet outil et à travers l'observation du contenu du SK de la vitesse, nous avons pu mettre en évidence que certaines composantes fréquentielles étaient particulièrement sensibles à la présence des défauts de roulements.

Nous avons ainsi pu observer que les défauts de roulements se manifestaient sur le SK de la vitesse par la présence d'harmoniques autour de fréquences faisant intervenir la fréquence caractéristique de cage. Ces fréquences sont principalement $f_{def} = f_{cage}$, $f_{def} = f_r - 2f_{cage}$, et $f_{def} = f_r - f_{cage}$. Une zone fréquentielle supplémentaire basse fréquence $f_{def} = [0 \dots f_{BF}]$ a également pu être mise en évidence grâce à cet outil. Cette zone est liée forcément à une modulation basse fréquence de la vitesse. L'origine de cette modulation peut être une oscillation du couple mécanique, due probablement à une excentricité comme expliqué au chapitre 1. Les signatures faisant uniquement intervenir f_r ne ressortent pas forcément dans ce SK car elles sont présentes à la fois en régime sain et en régime défaillant. De la même manière que pour l'étude basée sur le spectre, ces composantes aléatoires sur la vitesse de rotation vont se retrouver, par un principe de modulation, dans les SK des signaux de position, de courant statorique et de courant onduleur. Les familles obtenues alors obéissent aux mêmes lois de composition que celles déterminées dans le chapitre 2. Ainsi, nous allons retrouver des signatures à $(2k + 1)f_s \pm f_{def}$ sur le SK de la position, à $(6k \pm 1)f_s \pm f_{def}$ sur le SK du courant statorique et à $6kf_s \pm f_{def}$ sur le SK du courant onduleur.

Nous avons proposé l'introduction du SK cumulé pour construire des indicateurs exploitant les amplitudes des raies du SK des différentes grandeurs, limitées aux valeurs positives élevées au carré. Dans une première partie, nous avons montré l'indicateur SK global calculé sur l'ensemble des bandes fréquentielles, puis nous avons ciblé le calcul de l'indicateur autour de fréquence particulières, définies en fonction du signal observé.

Nous avons montré l'efficacité de l'indicateur SK global pour la détection de défauts. L'inconvénient de l'utilisation de ce type d'indicateur est la difficulté de classement du type de défaut. En effet, l'indicateur détecte le défaut dans une large bande fréquentielle sans donner aucune information sur la cause ou l'origine de ce défaut. L'utilisation de l'indicateur SK ciblé sur des fréquences particulières a partiellement résolu ce problème. En effet, un défaut de cage par exemple se manifestera sur des fréquences liées à la fréquence dite caractéristique de cage. Un indicateur ciblé sur ces fréquences détecte alors plus spécifiquement les défauts de cage.

Le problème est donc partiellement résolu et il est possible *a priori* de connaître l'origine du défaut. Restera une difficulté de détection dans le cas où les fréquences caractéristiques d'un défaut se confondent avec les fréquences caractéristiques d'un autre type de défaut. Ce point fait partie des perspectives de nos travaux.

L'utilisation des critères de performances présentés dans le chapitre 3 démontre bien l'efficacité de l'indicateur SK cumulé comparé à l'indicateur énergétique. Ces critères ont montré une meilleure performance de l'indicateur pour les différentes vitesses de fonctionnement, pour les différents signaux étudiés et pour les deux campagnes d'essai. À partir de ces critères, nous avons défini les gammes de fréquences les plus sensibles à la détection de présence de défauts pour chacun des signaux étudiés.

Les indicateurs obtenus par utilisation du SK cumulé sur les différentes grandeurs montrent bien une meilleure sensibilité ainsi qu'une variance de l'indicateur beaucoup plus faible que les indicateurs utilisant directement le spectre. L'utilisation de la grandeur vitesse se montre toujours la plus efficace pour la construction des indicateurs utilisant le SK. Toutefois, si cette solution, qui nécessite la reconstruction de la vitesse de rotation de l'actionneur, n'est pas envisageable d'un point de vue technique, l'utilisation des signaux de position, courant statorique et courant onduleur est cette fois beaucoup plus efficace que dans le cas des indicateurs énergétiques et permet d'envisager une détection efficace.

Finalement, l'indicateur original avec référence SK_{REF} est introduit. Il permet d'éviter l'effet cumulatif permanent du SK cumulé dans le cas où des événements transitoires non reliés aux défauts de roulements apparaissent. Ce nouvel indicateur conserve sa sensibilité aux événements non stationnaires présents dans les signaux étudiés mais, le mécanisme de référence et à la remise à zéro de la statistique nécessitent d'observer une répétition de phénomènes aléatoires pour affirmer la présence du défaut. Soit il est possible de s'affranchir ainsi plus facilement des fausses alarmes dans le cas où un événement inattendu et non lié à la dégradation des roulements, à lieu au cours des observations, soit le mécanisme de référence n'est pas utilisé et le SK cumulé détectera tous les défauts, électriques, mécaniques... Il faudra alors par exemple surveiller également le bus continu, pour rejeter transitoires de l'indicateur dont les variations de l'alimentation seraient la cause.

Conclusion générale

Nous avons dans cette thèse, étudié différentes approches permettant de concevoir des algorithmes adaptés à la détection des défauts de roulements dans les machines synchrones à aimants permanents haute vitesse. Traditionnellement, les signaux vibratoires, issus d'accéléromètres placés au plus près des roulements dans les machines électriques, sont largement utilisés pour suivre leur état de santé.. L'originalité de notre approche réside dans l'utilisation de grandeurs autres que les signaux vibratoires pour réaliser la surveillance et dans les méthodes proposées pour la construction des indicateurs. Ces grandeurs ont la particularité d'être soit déjà prélevées pour des besoins liés à la commande (signaux de position, courant de bus, ...) soit d'être plus facilement et économiquement mesurables sur l'équipement (courant de phase, courant onduleur...). La difficulté introduite par cette approche réside la mise au point de méthodologies d'extraction de l'information. En effet, éloigner la source de prélèvement de l'information de la source génératrice des défauts implique une complexification de l'information. L'information « utile » pour la détection se trouve modifiée par les sous-systèmes à travers desquels elle transite et mêlée à d'autres informations.

Ainsi, une première étape, que nous avons nommée capitalisation de connaissances, a été réalisée. Il s'agissait, dans un premier temps, d'appréhender le contenu des différents signaux en régime sain. Il a été constaté que les contenus harmoniques des signaux étudiés sont riches, même dans le cas sain. Ensuite, il s'agissait de comprendre, à travers les mécanismes liés à la génération des défauts et à la connaissance de l'équipement, de déterminer comment se manifestent, dans le domaine fréquentiel, les principales signatures des défauts dans les différentes grandeurs étudiées. Ces signatures ont permis de déterminer les principales informations fréquentielles qui permettent de distinguer le régime sain du régime défaillant. L'exploitation des résultats issus de deux campagnes d'essais, réalisées en dégradant artificiellement des roulements, a permis de confirmer la pertinence des signatures théoriques identifiées. De plus, grâce à l'importante quantité de données prélevée lors des deux campagnes d'essais, nous avons pu mettre en évidence l'aspect stochastique lié à l'apparition de certaines signatures fréquentielles.

Les connaissances acquises sur les différentes signatures nous ont tout d'abord conduits à proposer des indicateurs de défauts basés sur l'extraction de l'amplitude de certains harmoniques particulièrement sensibles aux défauts. Le comportement de ces indicateurs a été évalué par l'intermédiaire de critères de qualité. D'une manière générale, les indicateurs calculés sur les grandeurs de nature mécanique (vitesse et position) sont plus efficaces que ceux calculés sur les grandeurs de nature électrique (courant statorique et courant d'onduleur). Ceci confirme l'importance de favoriser une prise d'information au plus près des sources physiquement génératrices de défauts.

Nous avons remarqué, suite à l'analyse de ces campagnes, une variance non négligeable dans les valeurs des indicateurs, selon les vitesses et les fréquences sélectionnées. Ceci montre que l'apparition des harmoniques que nous surveillons à travers ces indicateurs présente un caractère aléatoire non négligeable. Cela confirme que les signatures de défauts étudiés sont plutôt de nature non stationnaire. Leur présence et/ou leur importance au cours des observations successives est variable, conduisant à des indicateurs eux aussi variables.

Le Kurtosis spectral possède l'intéressante propriété de faire ressortir dans le spectre d'une grandeur, les composantes fréquentielles dont l'apparition se manifeste de manière aléatoire.

Conclusion générale

En effet, avec cet outil, les composantes stationnaires se caractérisent par des amplitudes qui tendent vers -1 contrairement aux composantes non stationnaires dont les amplitudes se distinguent par des valeurs positives.

Nous avons remarqués, dans le SK de la vitesse, que l'harmonique à la fréquence de cage est le plus sensible au défaut étudié. Ceci est logique puisque la cage était cassée en deux points pour accélérer le vieillissement du roulement. Pour les signaux de position, courant statorique et courant onduleur, nous remarquons que les harmoniques les plus sensibles au défaut dans le SK sont les harmoniques présents autour de la fréquence fondamentale de chaque signal, à savoir, $f_s \pm f_{def}$ (ou plus généralement $(2k + 1)f_s \pm f_{def}$) sur le SK de la position, à $f_s \pm f_{def}$ (ou plus généralement $(6k \pm 1)f_s \pm f_{def}$) sur le SK du courant statorique et à $6f_s \pm f_{def}$ (ou plus généralement $6kf_s \pm f_{def}$) sur le SK du courant onduleur.

Nous avons alors proposé l'introduction du SK cumulé pour construire des indicateurs exploitant les amplitudes des raies du SK des différentes grandeurs. Dans une première partie, nous avons calculé un indicateur global exploitant l'ensemble des bandes fréquentielles du SK, puis nous avons ciblé le calcul de l'indicateur autour de fréquences particulières.

Nous avons montré, en exploitant les données expérimentales issues des différentes campagnes d'essais, l'efficacité de l'indicateur SK global pour la détection des défauts de roulement. L'inconvénient lié à l'utilisation de ce type d'indicateur est justement son caractère global puisqu'il inclut l'ensemble des fréquences possédant un caractère stochastique et pas spécifiquement celles liées aux défauts à surveiller. L'utilisation de l'indicateur SK ciblé sur des fréquences particulières a partiellement résolu ce problème. En effet, un défaut de cage par exemple se manifestera sur des fréquences liées à la fréquence caractéristique du défaut de cage. Un indicateur ciblé sur ces fréquences détecte seulement ce type de défaut.

L'utilisation des critères de performances démontre bien l'efficacité de l'indicateur SK cumulé comparé à l'indicateur énergétique. Ces critères ont montré une meilleure performance de l'indicateur pour les différentes vitesses de fonctionnement, pour les différents signaux étudiés et pour les deux campagnes d'essais. A partir de ces critères, nous avons défini les gammes de fréquences les plus sensibles à la présence de défauts pour chacun des signaux étudiés.

Suivant les critères que nous avons définis, les meilleures performances des indicateurs sont obtenues pour le signal de vitesse, puis pour le signal de position, puis sur les courants statoriques et enfin sur le courant d'onduleur. Nous proposons donc préférentiellement de construire l'indicateur sur un signal de vitesse ou de position.

Finalement, l'indicateur avec référence SK_{REF} est introduit. Il permet d'éviter l'effet cumulatif permanent du SK cumulé dans le cas où des événements transitoires apparaissent, non reliés aux défauts de roulements,. Il peut s'agir par exemple de perturbations aérauliques, ou à de perturbations de la tension du bus continu alimentant l'équipement, conduisant à des variations transitoires de la vitesse du ventilateur. Ces phénomènes ne doivent pas être, malgré leur caractère clairement non stationnaire, interprétés comme des événements liés à des défauts de roulements. L'indicateur conserve sa sensibilité aux événements non stationnaires mais, grâce au mécanisme de référence et à la remise à zéro de la statistique, introduit la nécessité d'observer une répétition des signatures pour affirmer la présence du défaut. On peut ainsi s'affranchir plus facilement des fausses alarmes dans le cas où un événement inattendu, entraînant une réaction de l'indicateur, a lieu au cours des observations et rendre ainsi le diagnostic plus robuste.

Notre travail constitue donc une contribution originale aux problèmes liés au diagnostic des défauts de roulements sur des entraînements synchrones haute vitesse à aimants permanents. Un certain nombre de points constituent néanmoins des perspectives intéressantes, tant sur le plan de la validation expérimentale que de la comparaison avec d'autres techniques.

PERSPECTIVES

Concernant les perspectives de ce travail, notons tout d'abord que « seulement » deux campagnes d'essais ont été réalisées sur l'équipement. Comme nous avons pu l'observer, d'une campagne à l'autre, les mécanismes de dégradations peuvent être sensiblement différents, conduisant à des comportements de l'équipement différents sur la « fin de vie ». Il aurait été intéressant de disposer de davantage de données issues de campagnes de vieillissement pour permettre de préciser la confiance que l'on peut accorder à nos stratégies de détection. De plus, les études réalisées dans cette thèse ont été menées sur un seul type de ventilateur. D'autres équipements similaires existent chez TECNOFAN et notamment des équipements de plus forte puissance, pour lesquels nos stratégies de détection n'ont pas été testées. Des campagnes supplémentaires auraient là encore, constitué un plus pour correctement appréhender le comportement des indicateurs sur de plus larges gammes de produits.

Ensuite, les indicateurs étudiés ont été construits de manière à respecter les contraintes liées à une application temps réel. Malheureusement, nous n'avons pu dans le cadre de cette thèse, réaliser l'implantation des algorithmes sur ce type de cible. Ce travail sera mené dans le cadre du projet PREMEP 2, dans lequel il est prévu d'intégrer les algorithmes de détection dans les cartes de contrôle / commande utilisées pour le pilotage du moteur. Les contraintes matérielles et calculatoire liées l'introduction de cette nouvelle fonction de surveillance seront, dans ce contexte, évaluées et une version « test » de l'algorithme sera implantée. L'objectif est de pouvoir embarquer, à bord d'un avion en conditions de fonctionnement réelles, un ventilateur équipé de cette fonction de détection. Cette dernière ne sera pas forcément reliée dans un premier temps aux fonctions de supervision et de décision mais il s'agit de pouvoir réaliser un suivi de l'évolution de l'indicateur de surveillance au cours de la vie « in situ » du ventilateur.

Les défauts que nous avons étudiés au cours de ce travail sont uniquement les défauts liés à la dégradation des roulements. Cependant, nous avons montré, à travers l'analyse des différentes campagnes d'essais, que d'autres types d'événements ont pu être mis en évidence grâce aux indicateurs proposés. Une autre perspective de ce travail pourrait donc être de mettre au point d'autres indicateurs permettant d'enrichir les types de défauts surveillés, comme par exemple certains défauts électriques n'entraînant pas à court terme une immobilisation du ventilateur, mais pouvant, à long terme, s'avérer plus dangereux. La mise en évidence, au cours de la campagne d'essai n°1, d'un défaut sur une des selfs de l'étage d'entrée de l'équipement, constitue un bon exemple. Bien évidemment, les fréquences à cibler seront différentes de celles utilisées pour les défauts de roulements mais les méthodologies de traitement utilisées dans cette thèse sont également applicables dans ce nouveau contexte.

Comme nous l'avons remarqué dans la littérature, les champs méthodologiques concernant les outils de traitement de l'information sont nombreux. D'autres techniques de traitement du signal, possédant des propriétés intéressantes par rapport aux caractéristiques de nos signaux, restent à tester. Il est possible par exemple citer l'utilisation du Kurtogram, qui pourrait contribuer à une amélioration des performances de détection [90] par une automatisation du choix des paramètres de calcul du Kurtosis spectral, de la bande fréquentielle sensible à la présence du défaut ou de l'excursion fréquentielle, pour maximiser la sensibilité de l'indicateur. D'autres techniques de traitement, comme les techniques de décomposition des composantes périodiques et apériodiques d'un signal, pourraient également être intéressantes

[117][118].Elles permettent de séparer, à l'aide de technique de filtrage optimal, les composantes d'un signal présentant un caractère de périodicité de celles n'en possédant pas, ce qui rejoint les caractéristiques que nous avons cherché à extraire de nos signaux avec le Kurtosis spectral.

Enfin, pour mener ces travaux, nous nous sommes basées sur une étape importante de capitalisation, afin d'acquérir des connaissances *a priori* sur le comportement de l'équipement surveillé, en régime sain comme en régime défaillant. Il nous semble cependant intéressant de développer des approches sans *a priori*, qui permettrait, sans disposer d'autant de connaissances sur l'équipement surveillé, de mettre en avant des différences entre des observations. Ces approches, plus orientées vers un traitement statistique de l'information, consistent à établir, à partir d'un ensemble de données expérimentales, certaines caractéristiques des signaux permettant de faire des distinctions entre des observations successives d'un signal. Ainsi, [104] a testé au LAPLACE une technique statistique pour le calcul d'un indicateur en exploitant les données expérimentales recueillies lors des deux campagnes d'essais. La méthode consiste à centrer et réduire le spectre du courant statorique à partir d'une référence obtenue sur les premiers enregistrements sains. Les écarts statistiques constatés par rapport à la référence sur les différentes réalisations du courant statorique ont ensuite été exploités pour déterminer les gammes fréquentielles les plus sensibles au défaut. Un indicateur, dont les performances ont été démontrées, a ensuite été construit à partir de ces gammes fréquentielles obtenus sans connaissance *a priori*.

Enfin, nos indicateurs pourront être combinés à des méthodes de classification pour l'identification éventuelle du type de défaut (cage, bille, circlip, alimentation...).

La grande aventure du health monitoring ne fait que commencer...

Lire
la seconde partie
de la thèse